

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



以數位光學處理進行 3D 列印製作微米級結構

3D Print Micro-scale structure by Digital Light Processing

林軒邑

Hsuan-Yi Lin

指導教授：單秋成 博士

Advisor: Chow-Shing Shin, Ph.D.

中華民國 106 年 7 月

July, 2017



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

以數位光學處理進行 3D 列印製作微米級結構

3D Print micro-scale structure by Digital Light Processing

本論文係林軒邑君（R04522536）在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 106 年 7 月 7 日承下列考試委員審查通過
及口試及格，特此證明

口試委員：

單秋成 (簽名)
(指導教授)

李乾郎

吳文方

系主任

黃美娟 (簽名)



致謝

能完成這篇論文，首先要感謝我的指導老師 單秋成教授，讓我學到很多做事情的方法，從無到有的架設出一台 3D 列印機，遇到問題時會給我許多可以去嘗試的建議與方法。感謝口試委員 吳文方教授、林志郎教授給我許多論文上的指導。還要感謝黃師傅，有你的幫忙讓我可以順利的架設儀器。

再來要感謝俊廷學長，教我實驗的步驟跟方法，做實驗跟寫論文時都給我很多指導與建議。感謝易叡學長幫了我很多忙，跟俊廷在論文與實驗地獄中還可以抽空幫我組裝抽風櫃，真的太感動了。感謝戰友子傑，口試前崩潰的時光還好有你互相鼓勵才能讓我撐到最後，以後有機會在一起重訓啊。感謝同學奕杰、鵬瑞讓我在這兩年學到很多不一樣的東西。感謝學弟四隻小恐龍，跟你們講垃圾話真的很舒壓，能認識你們真的很讚。

最後要感謝一路上默默支持我的家人們和女友，讓我碩二整年可以專心在實驗跟論文上，不用去顧慮太多事情，心情低落時陪我吐苦水宣洩壓力，關鍵時刻跳出來提供最給力的協助，謝謝你們無怨無悔的付出。



摘要

近幾年 3D 列印技術發展成熟，以印製微小結構來說，雙光子聚合技術(Two-photon Polymerization, TPP)是目前能達到奈米等級的製造技術，但設備相對來說也較貴；微機電製程技術在微小結構之製作上也已經非常成熟，但由於光罩上的限制，設計結構方面較不方便。本論文主要在研究如何以數位光學處理(Digital Light Processing, DLP)之光固化技術，印製微米級結構，使用商用 DLP 投影機並將鏡頭改裝，搭配顯微物鏡縮小影像，接著探討在此系統下樹酯之選用及配方調整、曝光時間、切層厚度等等列印參數對於製程上的影響。目標是以較低成本之 DLP 技術做出既能逼近雙光子聚合技術之微小尺寸，又能快速的印製出較大的微米級結構。利用 MATLAB 軟體分析及實驗後，設計結構為六角形蜂窩狀，並將結構尺寸縮小，設計尺寸邊長由 $150\mu\text{m}$ 逐漸縮小至 $20\mu\text{m}$ ，最後可成功印出實際邊長為 $23\mu\text{m}$ 之通透結構。最後再對不同尺寸之結構做三點彎曲測試，探討列印時不同參數下對結構之影響。

關鍵字:光固化技術、微米級結構、三點彎曲測試



Abstract

The technology of 3D Printing has been well-developed in recent years. To print micro-scale structure, the TPP (Two-photon Polymerization) is the only feasible production technology for nanostructure but it requires the most expensive equipments. The micro-electromechanical system for producing micro-scale structure is also a well-defined technique. However, owing to the limitation of Reticle-Mask, it is considerably challenged for structure designing. The main issue of this article is to research on how to use the DLP (Digital Light Processing) Vat Polymerization to print micro-scale structure. The business DLP projector is adopted and its lens has been adjusted to fit the microscope to shrinkage the image. Furthermore, the study discusses the following variables that influence the production procedure, including different DB composition, exposure time and cutting thickness. My study intends to find a cost-efficient DLP technology that simulates the effect of micro-scale structure by using TPP technology and maintains the privilege to print larger micro-scale structure in a higher rate. By using MATLAB software to analyze and experiment, it has been decided to use the hex honeycomb structure model and gradually reduce the size of the structure from 150 μm to 20 μm . The edge length of 23 μm is successfully printed to be a penetrable structure. Finally, 3-point bending test is used to compare the influences of different parameters.

Keyword: Vat polymerization, Micro-scale structure, 3-point bending test

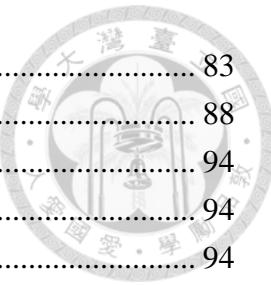


目錄

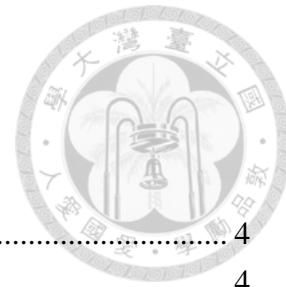
摘要	III
Abstract.....	IV
目錄	V
圖目錄	VIII
表目錄	XV
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	2
1.3 論文架構	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 積層製造技術	3
2.1.1 光固化成型技術 Vat Polymerization	3
2.1.2 材料擠出成型技術 Material Extrusion	4
2.1.3 粉體融化成型技術 Powder Bed Fusion.....	5
2.1.4 材料噴塗成型技術 Material Jetting	6
2.1.5 指向性能量沉積技術 Directed Energy Deposition	7
2.1.6 疊層製造技術 Sheet Lamination	7
2.1.7 黏著劑噴塗成型技術 Binder Jetting.....	8
2.2 DLP 光固化成型技術.....	9
2.2.1 DLP 投影機.....	9
2.2.2 DMD 晶片	10
2.2.3 DLP 光固化上照式與下照式比較.....	12
2.3 微快速成型系統	13
2.3.1 動態光罩式三維微影系統	14
2.3.2 顯微鏡微影系統	15
2.4 雙光子聚合微製造技術	18
2.5 Dark Cure	20
第三章 實驗架設與設備	22
3.1 系統架構	22



3.1.1	投影機	22
3.1.2	顯微物鏡	25
3.1.3	CCD 對焦系統	26
3.1.4	移動平台	34
3.2	實驗相關設備	37
3.2.1	超音波震盪機	37
3.2.2	磁石攪拌機	37
3.2.3	電子顯微鏡 SEM(Scanning Electron Microscope)	38
3.2.4	立體顯微鏡	38
3.2.5	金相顯微鏡搭配相機	39
3.2.6	恆溫恆濕箱	40
3.2.7	UV 紫外光燈	40
3.3	樹酯選用	41
3.4	三點彎曲試驗相關設備	42
3.4.1	Load Cell	44
3.4.2	LVDT	45
3.4.3	試驗流程	45
	第四章 實驗方法與分析	47
4.1	實驗方法與流程	47
4.1.1	3D 列印流程	47
4.1.2	結構折斷方法	48
4.1.3	Post cure	49
4.2	Dark cure 分析	49
4.2.1	數位光學原理	49
4.2.2	Dark cure 現象	50
4.2.3	角度分析	58
4.2.4	小結	60
	第五章 實驗結果	61
5.1	結構設計與命名	61
5.2	結構通透測試	62
5.2.1	結構 150-21-100	63
5.2.2	結構 120-7-100	68
5.2.3	結構 100-7-100	70
5.2.4	結構 80-5-100	71
5.2.5	結構 50-5-50	75
5.2.6	結構 40-5-40	79



5.2.7	結構 30-4-30.....	83
5.2.8	結構 20-4-20.....	88
5.2.9	小結	94
5.3	試片印製	94
5.3.1	試片尺寸設定	94
5.3.2	試片參數設定	95
5.3.3	試片印製成果	96
5.4	三點彎曲測試	102
5.4.1	試片一致性測試	102
5.4.2	列印參數影響測試	105
5.4.3	小結	111
第六章 結論與未來展望		112
6.1	結論	112
6.2	未來展望	113
參考文獻		114
附錄		117



圖目錄

圖 2.1 SLA 光固化技術[4]	4
圖 2.2 DLP 光固化技術[4]	4
圖 2.3 材料擠出成型技術[1].....	5
圖 2.4 粉體融化成型技術[6].....	6
圖 2.5 材料噴塗成型技術[7].....	6
圖 2.6 指向性能量沉積技術[1].....	7
圖 2.7 疊層製造技術[8].....	8
圖 2.8 黏著劑噴塗噴塗成型技術[1].....	9
圖 2.9 DLP 投影機構造[10].....	10
圖 2.10 DMD 晶片成像原理[11]	11
圖 2.11 上照式 DLP 光固化系統式意圖[12]	12
圖 2.12 下照式 DLP 光固化系統式意圖[12]	13
圖 2.13 (a)動態光罩式三維微影系統光路設計示意圖(b)微風扇尺寸[13]	14
圖 2.14 顯微鏡微影系統架構圖[15].....	15
圖 2.15 紫外光 DMD 無光罩微影系統之發展[16]	17
圖 2.16 Integral Microstereolithography 系統架構圖[19]	18
圖 2.17 利用 TPP 微製造系統製作多孔微結構(a)結構頂部(b)局部放大圖 [20].....	19
圖 2.18 利用 TPP 微製造技術所製作之微結構[21].....	19
圖 2.19 Cure Depth 與不同染料之濃度比較關係圖[22]	20
圖 2.20 添加染劑 HMB 前(a)後(b)比對圖[24]	21
圖 2.21 添加 3%BAPO 及不同比例的 HMB 與 TiO ₂ 對 Cure depth 之影響 [24].....	22
圖 3.1 投影機 ACER P1500	23
圖 3.2 投影面積隨 DMD 與透鏡之間距離變化[25]	24
圖 3.3 投影機鏡頭	24
圖 3.4 投影機鏡頭改裝之套筒	25
圖 3.5 套筒與投影鏡頭組裝示意圖	25
圖 3.6 (a)平場 10 倍物鏡 (b)LMU-10X-NUV	26
圖 3.7 CCD 感光元件內部架構[26]	27
圖 3.8 uEye Cockpit 軟體設定	27
圖 3.9 CCD Camera 工作原理與實際架設圖.....	28



圖 3.10 (a)對焦平面 A、B 示意圖 (b)CCD 整組向上移動使對焦平面 A、 B 重合.....	29
圖 3.11 實際對焦情形	29
圖 3.12 對焦用網格圖案	30
圖 3.13 CCD 觀測對焦網格	31
圖 3.14 建構平面 C 與對焦平面 A、B 重合示意圖	32
圖 3.15 玻片貼上膠帶後與對焦平面重合之畫面	33
圖 3.16 玻片貼上膠帶後自對焦平面 (a) 上移 0.1mm (b) 上移 0.2mm (c) 下移 0.1mm(d)下移 0.2mm	33
圖 3.17 移動平台	34
圖 3.18 針盤指示量規	35
圖 3.19 LVDT 校正曲線(a)輸入位移與實際位移之關係曲線(b)電壓與實 際位移關係曲線	35
圖 3.20 每步位移(a) 1μm (b) 2μm(c)3μm (d) 4μm (e) 5μm 之實際位移-時 間關係圖	36
圖 3.21 超音波震盪機	37
圖 3.22 磁石攪拌機	37
圖 3.23 電子顯微鏡	38
圖 3.24 立體顯微鏡搭配 CCD 拍照系統	39
圖 3.25 金相顯微鏡&相機	39
圖 3.26 恒溫恒濕箱	40
圖 3.27 UV 紫外光燈	40
圖 3.28 Deep Black 光敏樹酯	41
圖 3.29 三點彎曲試驗機尺寸設計圖	42
圖 3.30 試驗機架設模擬示意圖	43
圖 3.31 三點彎曲試驗機實際架設情形	43
圖 3.32 Load Cell 型號 FS2050-0000-1500-G	44
圖 3.33 LVDT	45
圖 3.34 Load Cell 與 LVDT 同時記錄之 LabVIEW 方塊圖	45
圖 3.35 三點彎曲試驗步驟示意圖	46
圖 4.1 3D 列印步驟流程圖	47
圖 4.2 光點在投影面上形成之高斯分布光場模擬圖	50
圖 4.3 利用 uEye Cockpit 內建功能分析影像之亮度	50
圖 4.4 DB/7 像素寬之十字形模型	51
圖 4.5 使用 MATLAB 模擬投影光高斯分布之疊加情形	52
圖 4.6 十字形圖案使用 MATLAB 程式運算後之光場強度模擬立體圖	53
圖 4.7 十字形圖案使用 MATLAB 程式運算後之光場強度模擬 2D 圖 .	53

圖 4. 8 (a)灰階調整中間 5x5 灰階值降低至 100、周圍降低至 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果	54
圖 4. 9 (a)調整中間 5x5 之灰階值降低至 100、四個角落降低至 180、角落延伸之邊長為 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果	55
圖 4. 10 (a)調整中間 3x3 之灰階值降低至 0、外面一層灰階值 100、四個角落降低至 180、角落延伸之邊長為 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果	56
圖 4. 11 光場強度模擬圖(a)灰階亮度未經修改(b)灰階亮度修改後	57
圖 4. 12 灰階值修改前後比較圖	57
圖 4. 13 十字(90^0)切層圖片模擬區域示意圖	58
圖 4. 14 不同角度在光場高斯分布累加下的影響	60
圖 5. 1 (a)六角型蜂窩狀結構圖形 (b) 結構命名示意圖	61
圖 5. 2 (a)結構堆疊示意上視圖 (b)結構堆疊示意側視圖	62
圖 5. 3 結構-150 樹酯 DB0(a)實際印製上視圖 (b)結構設計上視圖 (c) 實際印製側視圖(d)結構設計側視圖	64
圖 5. 4 結構-150 樹酯 DB1 實際印製 (a)上視圖 (b)側視圖	65
圖 5. 5 結構-150 樹酯 DB2(a)實際印製(b)結構設計 上視圖	65
圖 5. 6 結構-150 樹酯 DB2(a)實際印製(b)結構設計側視圖	66
圖 5. 7 結構-150 實際印製(a)樹酯 DB3(b)樹酯 DB4 側視圖	66
圖 5. 8 結構-150 樹酯 DB5、曝光時間 400 毫秒(a)SEM 拍攝之結構頂部 (b)光學顯微鏡拍攝之結構側視圖	67
圖 5. 9 結構-150 樹酯 DB5、曝光時間 400 毫秒列印(a)SEM 拍攝之結構頂部 (b)SEM 拍攝之結構折斷面	67
圖 5. 10 結構-120 樹酯 DB (a)實際印製上視圖(b)結構設計上視圖(c)結構印製側視圖(d)結構設計側視圖	68
圖 5. 11 結構-120 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構(a)SEM 拍攝之結構頂部(b)SEM 拍攝之結構折斷面(c)光學顯微鏡拍攝之側視圖	69
圖 5. 12 結構-100 樹酯 DB5(a) SEM 拍攝之結構頂部(b)結構設計上視圖 (c)光學顯微鏡拍攝之結構側視圖(d)結構設計側視圖(e)SEM 拍攝之結構折斷面	71
圖 5. 13 結構-80 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖	71

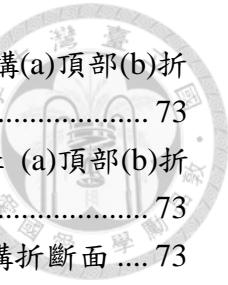


圖 5.14 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面	73
圖 5.15 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構 (a)頂部(b)折斷面	73
圖 5.16 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 900 毫秒列印之結構折斷面 ...	73
圖 5.17 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 500 毫秒列印之結構尺寸	74
圖 5.18 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構尺寸	74
圖 5.19 結構-50 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖	75
圖 5.20 結構-50 樹酯 DB5、曝光時間 300 毫秒列印之結構折斷面 ...	76
圖 5.21 結構-50 樹酯 DB6、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面(c)頂部局部放大圖	77
圖 5.22 結構-50 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部圖(b)折斷面	78
圖 5.23 結構-50 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構尺寸	78
圖 5.24 結構-40 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖	79
圖 5.25 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部並使用(a)金相顯微鏡(b)SEM 拍攝	80
圖 5.26 實際印製之壁厚情形示意圖	80
圖 5.27 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形	81
圖 5.28 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構在常溫下切斷之斷面	82
圖 5.29 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構在-20°C 冷凍後切斷之斷面	82
圖 5.30 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構尺寸	83
圖 5.31 結構-30 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面	84
圖 5.32 使用超音波震盪機震盪(a)5 分鐘(b)10 分鐘 產生頂部結構破損	84
圖 5.33 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面	85
圖 5.34 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面尺寸	86
圖 5.35 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部尺寸 .	87
圖 5.36 使用 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形	87
圖 5.37 結構-20 樹酯 DB8、曝光時間 300 毫秒列印並使用超音波震盪機震五分鐘之結構頂部	88
圖 5.38 結構-20 樹酯 DB9、切層厚度 4μm (a)曝光時間 600 毫秒(b)曝光	

時間 500 毫秒(c)曝光時間 400 毫秒(d)曝光時間 350 毫秒 列印之結構頂部	89
圖 5.39 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 350 毫秒列印之結構(a)頂部(b)在液態氮中折斷之斷面(c)頂部局部放大圖	91
圖 5.40 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)在液態氮中折斷之斷面(c)頂部局部放大圖	92
圖 5.41 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構，靜置在丙酮中三天後使用超音波震盪機震盪 5 分鐘，使用 SEM 拍攝(a)頂部(b)局部放大圖	93
圖 5.42 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構，靜置在丙酮中三天後使用超音波震盪機震盪 5 分鐘 (a)使用金相顯微鏡 (b)使用 SEM 拍攝之折斷面	93
圖 5.43 試片長寬設定	94
圖 5.44 試片-150/DB5/層厚 5 μm /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	96
圖 5.45 試片-120/DB5/層厚 5 μm /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	97
圖 5.46 試片-100/DB5/層厚 5 μm /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	98
圖 5.47 試片-80/DB5/層厚 5 μm /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	99
圖 5.48 試片-50/DB7/層厚 5 μm /曝光時間 500 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	100
圖 5.49 試片-40/DB7/層厚 5 μm /曝光時間 500 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖	101
圖 5.50 試片-30/DB8/層厚 5 μm ，金相顯微鏡拍攝試片頂部(a)曝光時間 900 毫秒(b) 曝光時間 700 毫秒.....	102
圖 5.51 試片-80 曝光時間 600-800 毫秒之一致性測試.....	103
圖 5.52 試片-150 曝光時間 600-800 毫秒之一致性測試.....	104
圖 5.53 (a)結構-150(b)結構-120(c)結構-100(d)結構-80 曝光時間 600ms-800ms 之機械性質比較.....	105



圖 5.54 曝光時間(a)600ms(b)700ms(c)800ms 印製不同尺寸結構之機械性質比較	106
圖 5.55 在不同溫度下加熱後對結構之影響	107
圖 5.56 試片印製完後使用 UV 光分別照射 1、2 小時進行二次固化處理	108
圖 5.57 試片 -80/DB6/ 曝光時間 600 毫秒 試片恢復測試	109
圖 5.58 試片 -80/ 曝光時間 800 毫秒(a)DB5 (b)DB6 試片恢復測試	109
圖 5.59 力量加載至不同位置停 1-2 秒後卸載	110
圖 5.60 力量加載至不同位置停 10 秒後卸載	110
附圖 1 結構-100 樹酯 DB5 、曝光時間 800 毫秒 SEM 拍攝之結構頂部	117
附圖 2 結構-100 樹酯 DB5 、曝光時間 800 毫秒 金相顯微鏡拍攝之結構頂部	117
附圖 3 結構-100 樹酯 DB3 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖	118
附圖 4 結構-80 樹酯 DB2 曝光時間 400 毫秒 頂部與斷面圖	118
附圖 5 結構-80 樹酯 DB3 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖	119
附圖 6 結構-80 樹酯 DB4 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖	119
附圖 7 結構-50 樹酯 DB5 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	120
附圖 8 結構-50 樹酯 DB5 曝光時間 400 毫秒 斷面圖	120
附圖 9 結構-50 樹酯 DB6 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	121
附圖 10 結構-50 樹酯 DB7 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	121
附圖 11 結構-40 樹酯 DB7 、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部圖與 (b)在 -20°C 冷凍後切斷之斷面	122
附圖 12 結構-40 樹酯 DB7 、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部圖與 (b)在 -20°C 冷凍後切斷之斷面	122
附圖 13 結構-30 樹酯 DB7 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	123
附圖 14 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部使用 (a)SEM(b)金相顯微鏡 拍攝比較圖	123
附圖 15 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	124
附圖 16 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒 斷面圖	124
附圖 17 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 350 毫秒列印之結構頂部	125
附圖 18 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部	125
附圖 19 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部	126
附圖 20 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面	126
附圖 21 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面	127
附圖 22 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面	127
附圖 23 結構-20 樹酯 DB9 、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面	128



- 附圖 24 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面 128
附圖 25 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部 129
附圖 26 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面 129



表目錄

表 3.1 顯微鏡規格	38
表 3.2 列印樹酯配方表	42
表 3.3 Load Cell 規格	44
表 5.1 實驗參數設定	95



第一章 緒論

1.1 前言

20世紀初，美國憑著製造業及工業實力成為世界上最大的經濟體，隨著工資逐漸升高，1970年代後期製造業開始大量轉移到工資較低的中國及東南亞國家，造成國內嚴重的失業問題。到了2013年，許多國家才發覺到製造業才是國家經濟長期發展的根本，因此美國總統歐巴馬喊出「讓製造業重返美國」的政策，其中重點產業就有3D列印。3D列印技術其實已經發展多年，其原理是建立電腦模型檔案後，運用金屬粉末或塑膠等等多種材料，透過層層堆疊列印以產生成品的技術。3D列印原本只是積層製造技術中的一個分支，但由於其在各種積層製造技術中應用最為廣泛，因此在一般的觀念中積層製造與3D列印這兩個名詞也就合而為一了。

近幾年3D列印技術趨向於尺寸的微小化，因此發展出許多不同的製造技術，為了製造出這些微小元件及微結構，雷射光刻與雙光子聚合是目前較為成熟的技術，其中又以雙光子聚合為目前可達到奈米級之積層製造技術，但相對來說設備也比較昂貴。就其他積層製造技術而言，若要印製微米級結構會有一定的限制存在。雖然目前3D列印技術越來越成熟，應用範圍也越來越廣泛，但是和其他製造技術一樣，其成品的應用是有缺點存在，所使用的塑膠或金屬材料並非完全無毒無害，若做為生醫材料可能會有生物不相容的問題，是否會產生有毒物質還需要進一步去驗證。而產品中又需要滿足不同需求，材料強度不盡相同，而現階段除了金屬材料之外，其餘材料的強度仍有待提升，將來如果可以將材料導向複合材料，可印製出來的產品能更多元化。



1.2 研究動機

以傳統去除材料的加工方法來製作微米級結構，會因為刀具的尺寸及結構的複雜度而無法加工，若以 3D 列印的方法堆疊成型則可以克服結構太過複雜的問題。為了達到快速堆疊成型的目標，本實驗選用 DLP 光固化技術，曝光成型以一個面為單位，相較於以點成型之技術來的快。一般市售的 DLP 投影機主要是將影像放大至投影幕上，為了印製微米級結構，必須縮小投影畫面以提高影像的解析度。本實驗室先前成功將投影機鏡頭改裝並縮小投影面積，將影像之理論解析度提高至 $2.2\mu\text{m}$ 。實驗中以此方法再做進一步的精進，使用顯微物鏡並利用幾何光學原理將投影面積縮得更小，理論解析度也會相對提高，並利用此系統印製微結構，目標將尺寸逐步縮小以達到微米等級，把最小尺寸推至極限，最後再對印製出來的微結構去做機械性質測試，分析並探討列印參數對結構印製之影響。

1.3 論文架構

論文共有六個章節，分為緒論、文獻回顧、實驗架設與設備、實驗方法與分析、實驗結果、結論與未來展望。

第一章緒論為前言與研究動機之說明；第二章文獻回顧，主要介紹 3D 列印技術分類，並針對 DLP 做進一步介紹，以及介紹微快速成型系統與雙光子聚合技術在製作微小物件上之方法，最後介紹 Dark cure 現象；第三章實驗架設與設備，介紹設備的架設與校正，以及其他相關設備，最後介紹三點彎曲測試之設備與實驗流程；第四章為實驗方法與分析，介紹實驗中使用到的方法以及利用 MATLAB 做 Dark cure 分析；第五章實驗結果，分為通透測試與機械性質測試之討論；第六章為結論與未來展望，統整實驗結果與實驗後續發展。



第二章 文獻回顧

2.1 積層製造技術

積層製造技術是利用 3D 繪圖軟體先繪製要製作之模型，再藉由切層軟體將 3D 模型轉換成 2D 圖形，以堆疊成型的方式製造。早期稱為快速原型(Rapid Prototyping)、快速製造(Rapid Manufacturing)，2010 年美國材料試驗協會(ASTM)將此技術正名為積層製造(Additive Manufacturing, AM)並訂定了一套標準，依製造的技術被分成七大類，分別為光固化成型技術、材料擠出成型技術、粉體融化成型技術、材料噴塗成型技術、指向性能量沉積技術、疊層製造技術、黏著劑噴塗成型技術[1]。

2.1.1 光固化成型技術 Vat Polymerization

光固化成型技術是以光敏樹酯作為主要材料，以控制光照射的區域來決定要固化的形狀，樹酯在接收特定波長的光後會硬化聚合成型。在所有技術中，此方法具有較高的列印準確度以及較佳的表面特性，可列印的材料廣泛、又可列印大型物件等[2]。以光源可區分為 SLA(Stereolithography Apparatus)如圖 2.1 所示，與 DLP(Digital Light Processing)如圖 2.2 所示，兩大類。SLA 使用兩個馬達，稱為電流計或振鏡（一個在 X 軸上，一個在 Y 軸上），快速地將雷射光束瞄準列印區域，使樹酯隨之而固化成形，完成一層固化後 Z 軸再向下移動一層進行下一次的固化。DLP 則是使用數位投影螢幕來照射列印平台上每一層的 2D 影像，而投影出來的影像圖形皆是由稱為像素的小矩形方塊形成。DLP 曝光的方式是一次一整個面，相較於 SLA 由一個光點來掃描成一個面，DLP 列印速度是快很多的[3]。

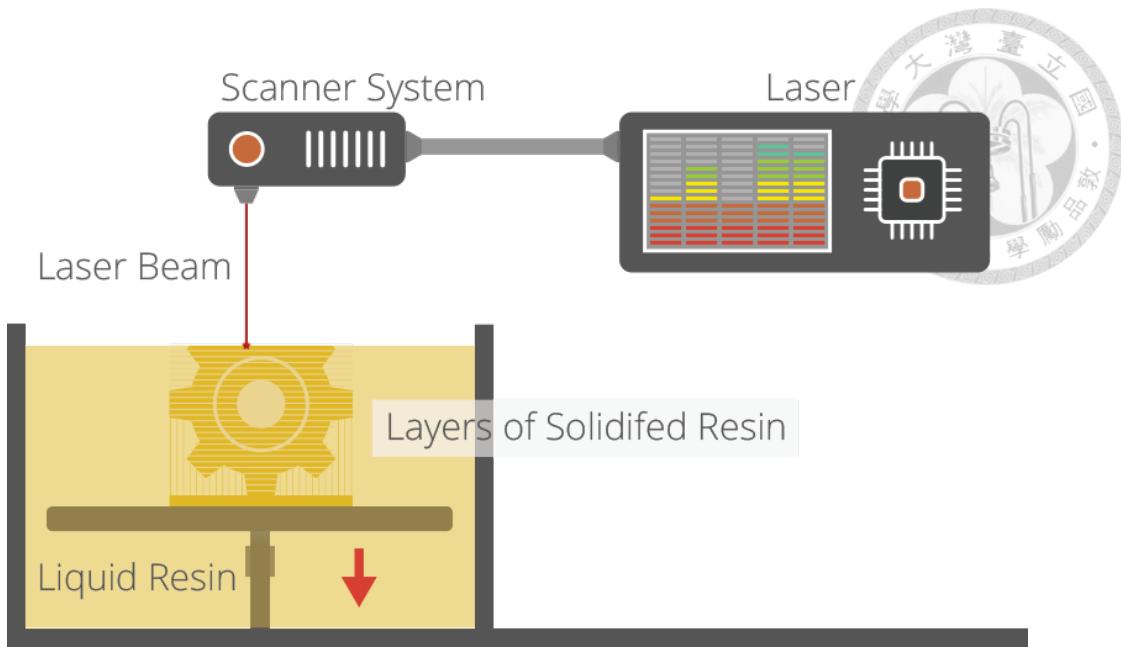


圖 2.1 SLA 光固化技術[4]

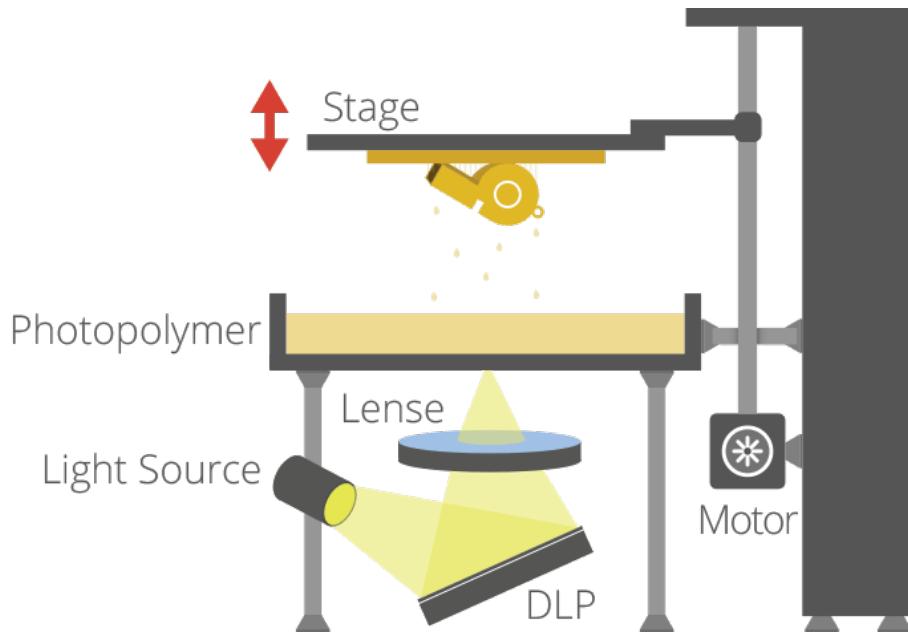


圖 2.2 DLP 光固化技術[4]

2.1.2 材料擠出成型技術 Material Extrusion

材料擠出成型技術又可稱為熔融沉積成型技術 Fused Deposition Modeling (FDM)或 Fused Filament Fabrication(FFM)，如圖 2.3。成型原理都是先將熱塑性材料加熱到一定溫度，型成半熔融狀態後再由噴頭(Heated nozzles)擠出，噴頭由 XY 移動平台控制擠出第一層 2D 圖形後，Z 軸再向下移動一層，重複同樣的步驟堆疊



成型。噴頭有兩種，一種是擠出建構成品的建模材料，另一種是用作支架的支撐材料(Support material)，列印完成後可剝除支撐材或用特殊溶液將它溶解。[5]

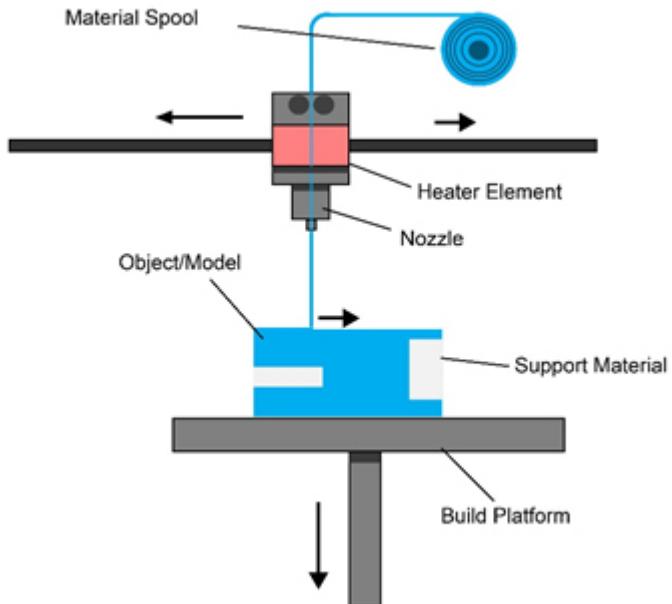


圖 2.3 材料擠出成型技術[1]

2.1.3 粉體融化成型技術 Powder Bed Fusion

又可稱為選擇性雷射燒結 Selective Laser Sintering(SLS)及選擇性雷射熔化 Selective Laser Melting(SLM)。如圖 2.4 所示，此技術成型方法是在構建平台上鋪上粉末原料，接著雷射光束在電腦的控制下掃描出要建構的二維圖形，被掃過的區域粉末會燒結成型，掃描完成後平台向下移動一個切層厚度，刮刀(Recoater Blade)再將粉末鋪平於建構平台上，重複步驟直到印完成品，最後再將多餘的粉末經打磨、烘乾等後製處理即可得到想要的成品[6]。

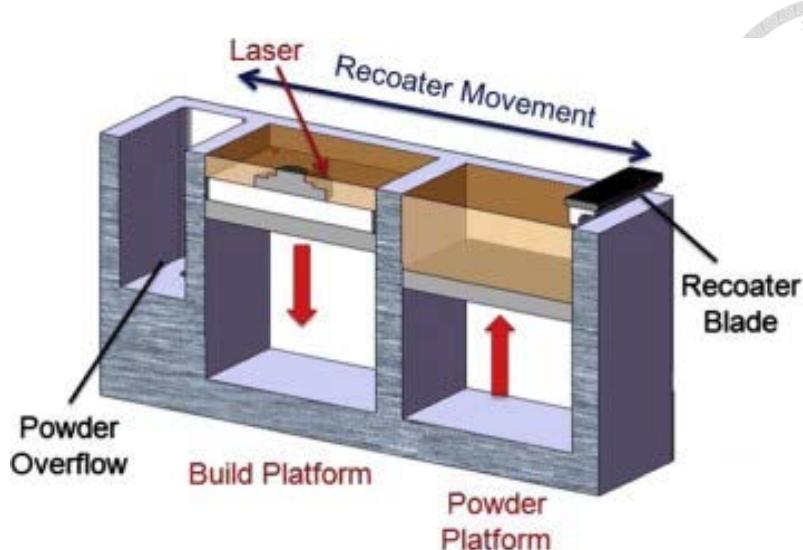


圖 2.4 粉體融化成型技術[6]

2.1.4 材料噴塗成型技術 Material Jetting

如圖 2.5 所示，材料噴塗成型技術使用兩種材料，一種是建構模型強度較高的材料(Model material)，另一種是填補空隙的支撐材(Support material)，噴頭(Jetting head)沿著 XY 平面移動將兩種樹酯噴射到 Z 軸移動平台上，再使用紫外光照射反應固化，完成一層後平台向下移動，一層一層的把設計的模型建立起來，最後把成品加熱或使用氫氧化鈉溶液去除支撐材。

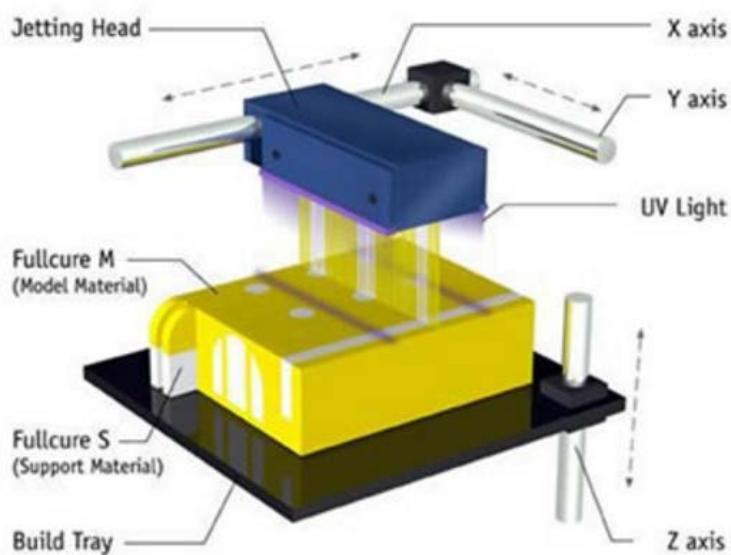


圖 2.5 材料噴塗成型技術[7]



2.1.5 指向性能量沉積技術 Directed Energy Deposition

指向性能量沉積技術又可稱為 Laser Engineered Net Shaping(LENS)，其原理類似於材料擠出成型技術，但是此方法的噴嘴因裝在多軸的機械手臂上，可以在多個方向上移動並且擠出要沉積的材料，再經過雷射光、電子束或等離子弧熔化後即可堆疊出想要的模型，材料主要是以金屬為主 [1]。

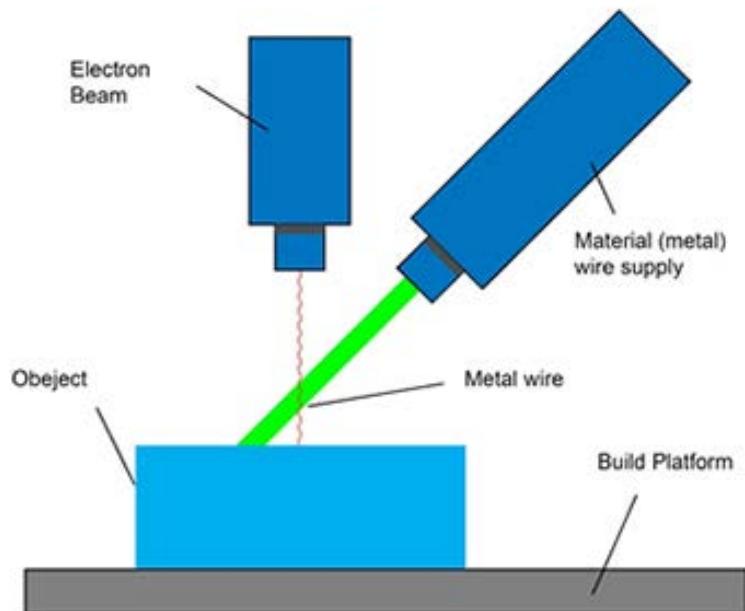
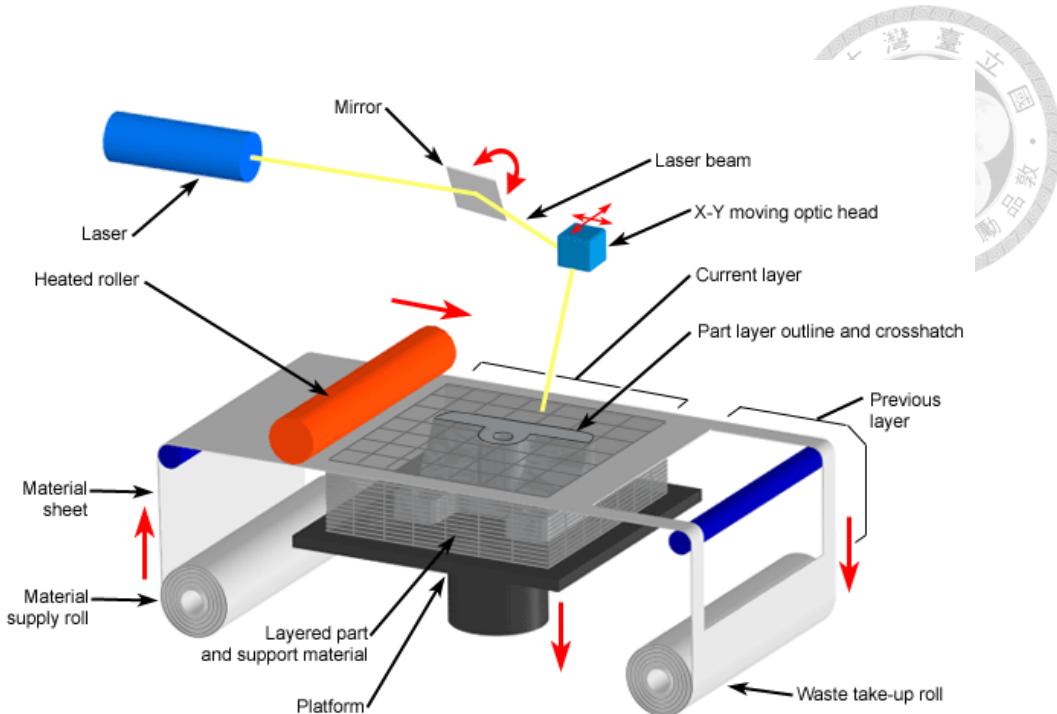


圖 2.6 指向性能量沉積技術[1]

2.1.6 疊層製造技術 Sheet Lamination

疊層製造技術是將片狀的材料當作基材，如圖 2.7 所示，利用雷射將材料切割成欲堆疊的圖形，Z 軸平台向下移動進行下一層的切割。依據使用的材料和疊層間連結的方式可分為 Laminated object manufacturing(LOM)和 Ultrasonic additive manufacturing(UAM)兩種，LOM 主要是使用紙張作為原料，層跟層之間用黏合劑黏接再一起。UAM 則是使用金屬作為疊層材料居多，例如鋁、銅、不鏽鋼和鈦，金屬層之間利用超音波焊接結合在一起，在焊接的過程中需要額外利用 CNC 加工去除未結合的金屬[8]。



Copyright © 2008 CustomPartNet

圖 2.7 疊層製造技術[8]

2.1.7 黏著劑噴塗成型技術 Binder Jetting

又可稱為三維噴塗黏結法（Three Dimensional Printing and Gluing，3DPG），加工過程中使用粉末基材和黏合劑兩種材料，粉末基材為模型的建構材料。如圖 2.8 所示，一開始先在平台上鋪一層薄薄的粉末，再利用噴頭(Inkjet Printhead)將黏合劑依設計的圖形噴在粉末上，完成一層後平台向下移動，由滾輪將粉末補平，再進行下一層印製。可使用的粉末材料較為廣泛，可以是金屬、聚合物(PA、ABS、PC)和玻璃[1]。

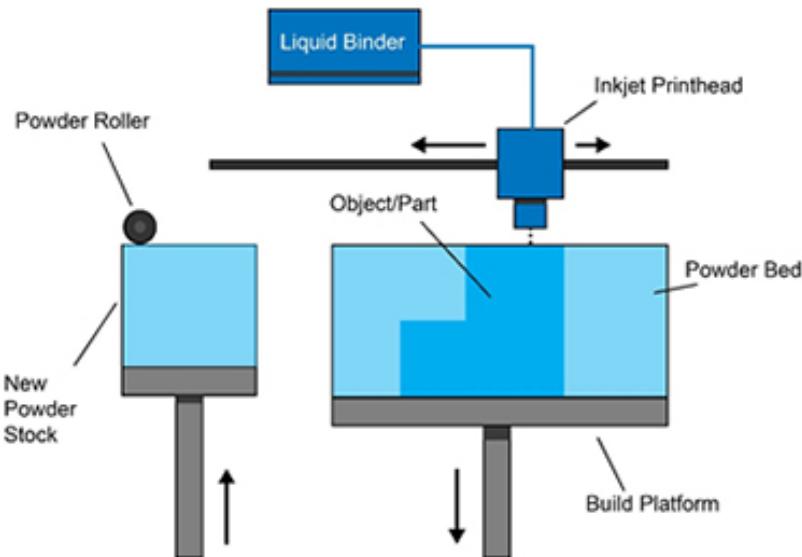


圖 2.8 黏著劑噴塗噴塗成型技術[1]

2.2 DLP 光固化成型技術

本研究採用 DLP 光固化成型技術，樹酯在吸收特定範圍波長的光產生反應後固化，以層層堆疊的方式製造出模型，此小節將對 DLP 光固化成型技術的原理、儀器做進一步的介紹。

2.2.1 DLP 投影機

DLP(Digital Light Processing 數位光學處理技術)，是由美國德州儀器的 Larry Hornbeck 博士研發成功的，自 1997 年開始從事運用反射用以控制光線投射的原理研究，並於 1987 年將 DMD(Digital Micromirror Device)研究成功 [9] 。其最大特點是為一全數位反射式投影機，不僅能使投影影像更為細緻，同時能有效縮小投影機的體積與重量，達到輕、薄、短、小的目的 [10] 。

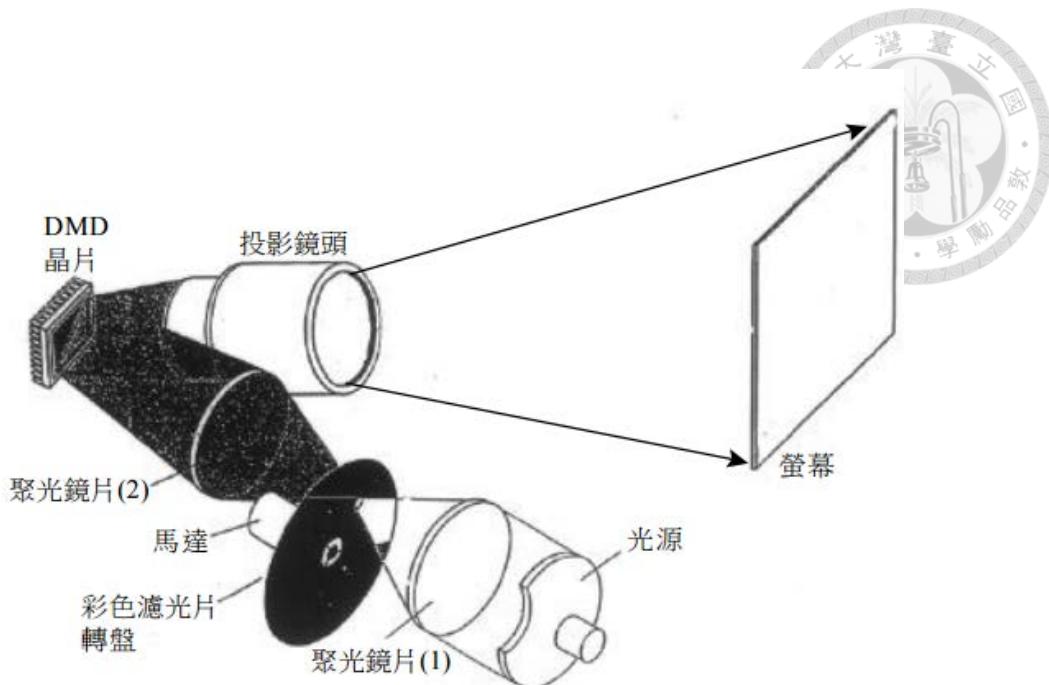


圖 2.9 DLP 投影機構造[10]

DLP 投影機如圖 2.9 所示，主要由光源、彩色濾光片轉盤、數位微鏡組顯示 DMD 晶片及投影鏡頭所構成。光源經過光罩集光後，藉由聚光鏡片(1)的聚焦，通過 RGB(Red, Green, Blue)三色濾光片轉盤，再由聚光鏡片(2)聚焦後入射 DMD 晶片上。DMD 上每個圖素的記憶體會記錄該圖素的訊號數位值，並將數位訊號送給驅動電極來產生微小反射鏡的正負角度偏轉與控制偏轉時間。RGB 三色濾光鏡轉盤速度為 60HZ，利用三色的交錯式技術達成全彩色效果 [10] 。

2.2.2 DMD 晶片

DMD 晶片上的微反射鏡可以將接收的光線從兩個方向反射出去，實際反射方向則視底層記憶晶胞的狀態而定。當記憶晶胞處於「ON」狀態時，反射鏡會旋轉至+12 度，把接收到的光線反射進入投影鏡頭(Projection Lens)並在螢幕上形成一個光點；若記憶晶胞處於「OFF」狀態，反射鏡會旋轉至-12 度，並把接收到的光線反射至鏡頭外，在螢幕上就不會有光點產生，如圖 2.10 所示。利用二位元脈衝寬度調變可以得到灰階效果，如果使用固定式或旋轉式彩色濾鏡，再搭配一顆或三顆 DMD 晶片，即可得到彩色顯示效果[11]。

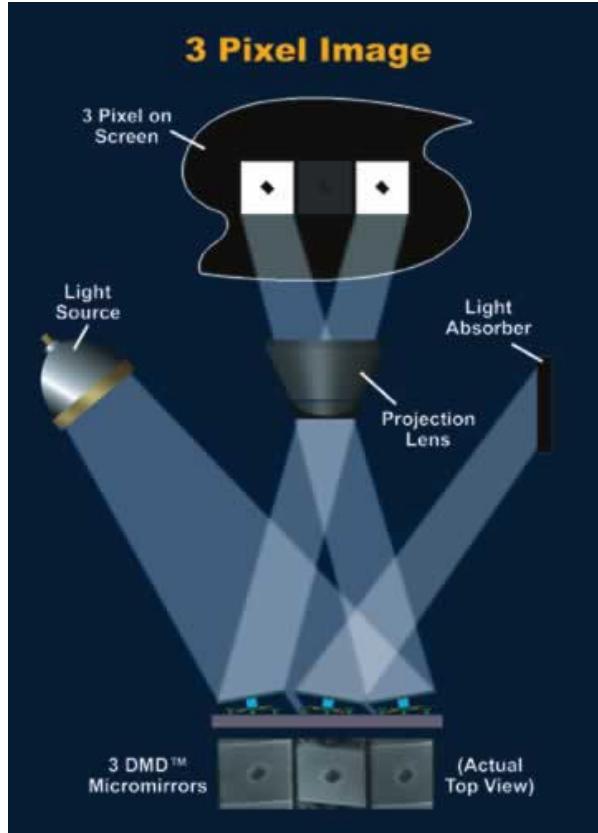


圖 2. 10 DMD 晶片成像原理[11]

在相同的時間週期內，光點停留的時間越久，螢幕上會顯得較亮；相反的時間越短則越暗。在一定的時間範圍中，將時間範圍依 2 進位為切分，藉由調整時間的長短就可以達成灰階的效果。而正因為採用 2 進位的灰階控制，所以應用這種技術的投影系統就被稱為數位光學處理(Digital Light Processing)[10]。



2.2.3 DLP 光固化上照式與下照式比較

DLP 光固化成型技術依投影機光源投影方式可分為上照式與下照式，光由上往下投影為上照式，由下往上投影為下照式，如圖 2.11 與圖 2.12，本小節將對這兩種方法進一步討論[12]。

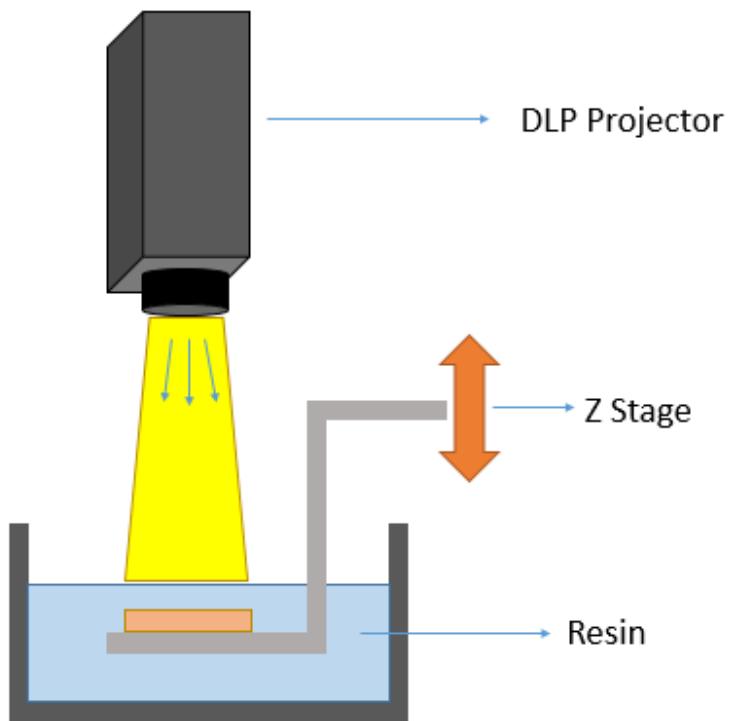


圖 2.11 上照式 DLP 光固化系統式意圖[12]

上照式系統是將光源由上往下曝光，如圖 2.11 所示，投影機的對焦面投影在樹酯表面，曝光反應固化後平台向下移動，液面覆蓋穩定後再進行下一次的曝光。列印的樣品高度取決於樹酯槽的高度以及樹酯的深度，若要列印較高的樣品就要使用較多的樹酯，容易造成浪費。每次列印前需將投影面對焦到移動平台的建構平面上，並將樹酯液面高度調整至與對焦平面同高才能列印。

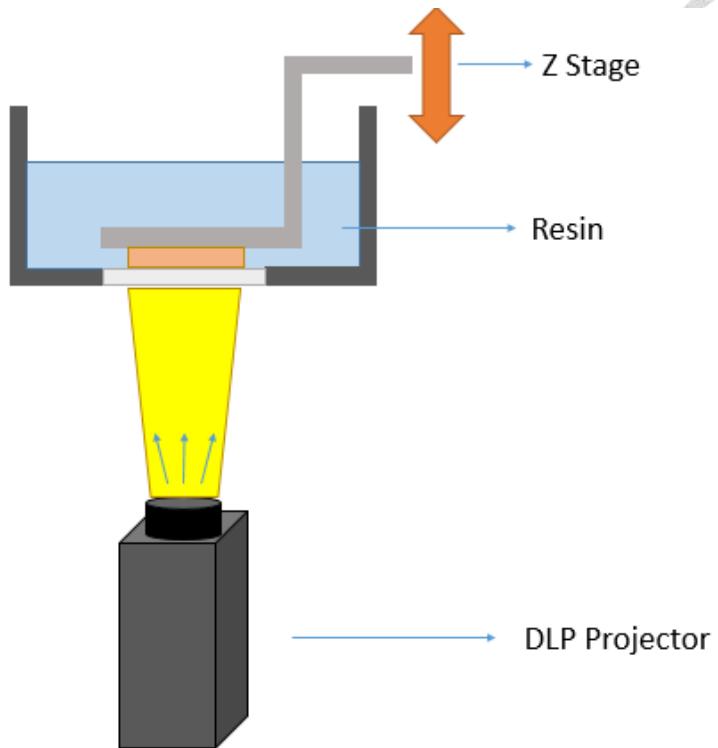


圖 2.12 下照式 DLP 光固化系統式意圖[12]

下照式系統光源是由下往上曝光，如圖 2.12 所示，每次曝光都是在樹酯底部固化，曝光後將平台向上抬升讓樹酯流進平台下方，再下降進行下一次曝光，樣品高度不會受到樹酯槽及樹酯高度影響，由於平台在列印時需要先上升後下降，因此平台移動需要相當高的精度，而平台向上抬升時與樹酯槽底部產生真空造成的拉拔力也是需要克服的問題。

比較過後，雖然下照式沒有對焦以及樹酯浪費的問題，但實驗上需要列印微米級結構，真空產生的拉拔力容易造成結構的損壞，因此實驗採用上照式系統。

2.3 微快速成型系統

為了提升影像解析度，以幾何光學理論來架設光學系統，將 DLP 投影畫面經過設計好的光學系統，使得投影面積縮的更小，達到提升列印尺寸精度的目的。



2.3.1 動態光罩式三維微影系統

此研究是使用 DMD 為動態光罩，並經由測試後得知此 DMD 晶片的每個微鏡面轉動角度為 10^0 ，因此在設計光路時，紫外光光源就由 DMD 晶片的右下方入射，使紫外光經 DMD 反射後的方向可以垂直 DMD 的中心，並通過設計的成像鏡組之中心軸。動態光罩式三維微影系統如圖 2.13(a)所示，紫外光源照射至動態光罩 DMD 後，藉由電腦控制來旋轉微鏡面反射出想要的光罩圖案(正轉一角度後為光罩圖案之白色區域，負轉一角度後為光罩圖案之黑色區域)，經過一焦距為 50mm 之雙凸透鏡聚焦，之後再由另一焦距為 50mm 之平凸透鏡縮小成像。而兩片透鏡中加入一光欄(Aperture Stop)，主要在減少光暈產生，使影像更清晰。

此實驗中原本紫外光源經 DMD 反射後的最大成像面積範圍為 $14.224\text{mm} \times 10.688\text{mm}$ ，理論最小成像尺寸(解析度)為 $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$ 。而通過設計之成像鏡組後，最大成像面積縮小至 $4\text{mm} \times 3\text{mm}$ ，理論之最小成像尺寸(解析度)為 $3.656\mu\text{m} \times 3.656\mu\text{m}$ ，放大倍率為 0.2812X [13]。最後成品微風扇之最小特徵尺寸達 $25\mu\text{m}$ ，如圖 2.13(b)所示。

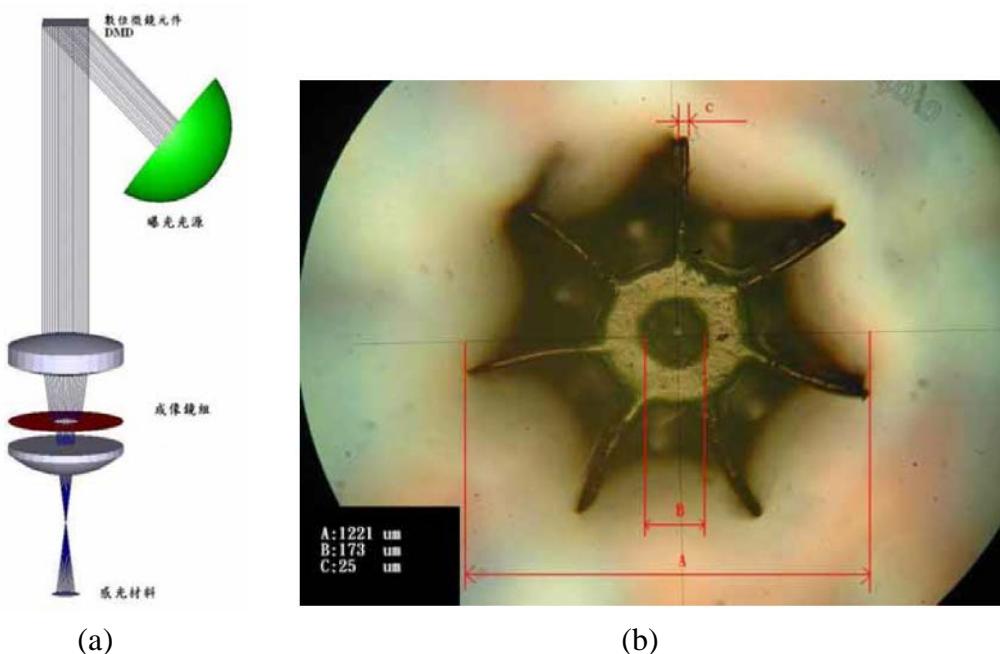


圖 2.13 (a)動態光罩式三維微影系統光路設計示意圖(b)微風扇尺寸[13]



2.3.2 顯微鏡微影系統

此系統的架構主要是將 DLP 投影機直接裝在顯微鏡上，將影像輸入目鏡並從物鏡輸出至移動平台上，利用顯微鏡本身良好的光學系統，可以省下光路設計和機構設計的人力與時間，成像品質也較為穩定。

2003 年，J. David Musgraves 將 DLP 投影機鏡頭拆下並裝在 NIKON ME600 金相顯微鏡上，旋轉物鏡可讓放大倍率從 5X 到 50X。微影系統中理論解析度 R 跟物鏡 Numerical Aperture(N.A)值的關係為

$$\text{解析度 } R = \frac{K_1 \times \lambda}{N.A} \quad (2.1)$$

其中 K_1 是與光阻材料有關的常數， λ 為使用光源的波長，他在實驗中使用的 50X 顯微物鏡其 N.A 值為 0.8，最小理論解析度可達 $0.4(\mu\text{m}/\text{pixel})$ ，但因實驗上的困難，最後做出的最小圖形特徵只到 $15\mu\text{m}$ 寬[14]。

2005 年，王群智[15]先把原本投影機的成像鏡頭拆掉由顯微鏡的目鏡取代，並將投影機與目鏡一起固定在顯微鏡上，影像經過目鏡與物鏡之後會在對焦平面上成現一縮小影像，如圖 2.14。透過 10X 目鏡與 10X 物鏡的縮小後，成像總面積大小為 $0.55 \times 0.75\text{mm}^2$ ，理論解析度為 $0.7(\mu\text{m}/\text{pixel})$ 。

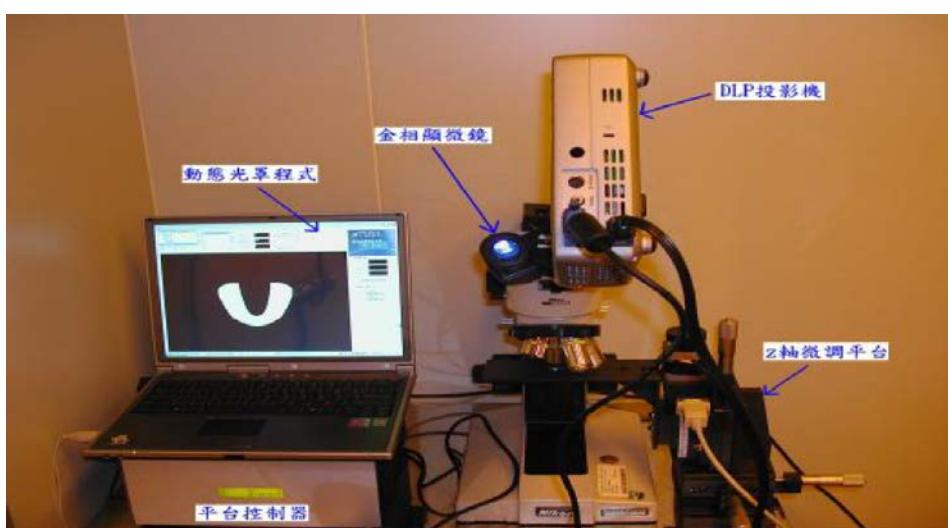


圖 2.14 顯微鏡微影系統架構圖[15]



2009 年，蒲鑫達[16]建立的紫外光 DMD 無光罩微影系統選用的顯微鏡為三眼觀測筒式顯微鏡，並將原本 DLP 投影機的燈泡光源改成紫外光源，因為微影加工的終極解析度(Ultimate Resolution)主要取決於使用的光源波長，由解析度 $R = \frac{K_1 \times \lambda}{N.A}$ (2.1)可以得知波長 λ 越小，投影出來的影像解析度就越小。原本內部的白光汞燈光源被紫外光源取代後，經由透鏡匯聚到 DLP 內部的 DMD 元件上，再經電腦訊號輸入使繪製的光罩圖案正確投影出來。另外將顯微鏡的第三觀測筒上裝上 10X 目鏡後，投影出來的圖案經再由目鏡輸入，由 10X、20X 的物鏡輸出影像到對焦平台上，即可得到兩種縮小影像的尺寸大小。10X 物鏡所得到的曝光範圍為 $1573 \times 1153\mu m^2$ ，最小理論解析度為 $1.524(\mu m/pixel)$ ，最後在影像 2pixel 曝光後測量得到實際線寬 $3.6\mu m$ ；20X 物鏡所得到的曝光範圍為 $932 \times 698\mu m^2$ ，最小理論解析度為 $0.96(\mu m/pixel)$ ，在影像 2pixel 曝光後測量得到實際線寬 $2.4\mu m$ 。



圖 2.15 紫外光 DMD 無光罩微影系統之發展[16]

2010 年，方偉凱[17]建立的無光罩微影系統，採用 Nikon E 系列的顯微鏡，將奧圖碼的 EX-530A 投影機架設於目鏡上，將畫面投影於目鏡的口徑中，經顯微鏡光學系統縮小後於平台成像，其中不同的是他在物鏡與平台中間加入一偏振片，測試曝光結果並比較。在 10X 目鏡 5X 物鏡下無線偏振片之最小線寬為 $4.4\mu\text{m}$ ，有線偏振片之最小線寬為 $4.8\mu\text{m}$ ；10X 目鏡 10X 物鏡下無線偏振片之最小線寬為 $1.76\mu\text{m}$ ，有線偏振片之最小線寬為 $2.48\mu\text{m}$ 。雖然加入線偏振片可以降低光干涉，提升線寬之輪廓及線寬之間距比例，但其微影解析度皆不及無線偏振片者。

2010 年，Dhanesh Kattipparambil Rajan 和 Jukka Lekkala 等人[18]使用投影機型號 View Sonic PJ458D 解析度 1024×768 ，顯微鏡型號 SMZ-168，並將搭配的 10X 目鏡向外伸長 10mm，投影畫面經過此系統後縮小至 $16\text{mm} \times 12\text{mm}$ ，解析度約為 $16\mu\text{m}$ 。

瑞士聯邦工業大學(Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne)研發出 Integral Microstereolithography 系統，如圖 2.16 所示，此系統使用一動態圖案產生器(Dynamic pattern generator)代替光罩，光源打入圖案產生器產生加工圖案，並經由光學元件將影像聚焦在建構平台上，每次曝光完成後即下降一高度，待液面鋪平後再進行下一次曝光[19]。

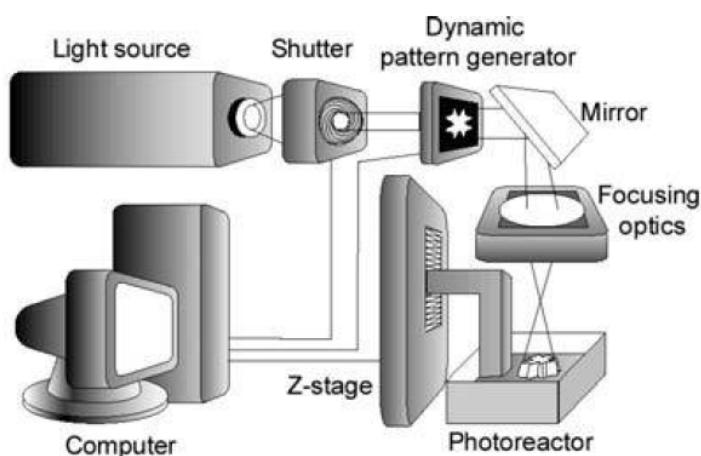


圖 2.16 Integral Microstereolithography 系統架構圖[19]

2.4 雙光子聚合微製造技術

雙光子聚合微製造技術(Two-photonpolymerization, TPP)，是目前可以達到奈米等級的積層製造技術，利用較低能量的近紅外光飛秒雷射作為光源(波長 800nm)，聚合作用僅發生於雷射光聚焦處，若未達到吸收雙光子的能量大小就不會反應，雷射光可以精確的掃瞄空間中任何一點使其反應固化，不會有深度方向過度成化或液面高低的問題。

2010 年，Stichel 等人[20]利用 TPP 微製造技術，製造出大尺寸的立體支架微結構，總體積為 $5 \times 5 \times 1.2\text{mm}^3$ ，如圖 2.17 所示，其最小孔徑之直徑約為 $10\mu\text{m}$ 。該研究提出一套改良式的 TPP 微製造技術系統，此系統利用了長行程的空氣軸承軸運動平台系統、工作距離較長之物鏡與 AOM 等元件來進行實驗。

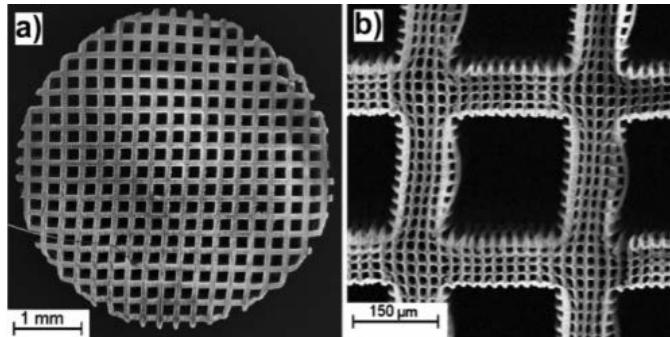


圖 2.17 利用 TPP 微製造系統製作多孔微結構(a)結構頂部(b)局部放大圖[20]

2012 年，DANILEVIČIUS 等人[21]同樣使用 TPP 微製造技術，製造出醫療用之細胞生長支架與人工血管支架微結構，其圖 2.18(a)為 $5 \times 5 \times 0.3\text{mm}^3$ 之碟形支架(結構孔徑約為 $40 \times 40 \times 40\mu\text{m}^3$ ，孔隙率約 40%)，圖 2.18(b)為外直徑 3 mm、內直徑 1.5 mm、總長 6 mm 之中空血管支架(孔徑為 $50 \times 50 \times 100\mu\text{m}^3$ ，孔隙率約 60%)。此架構於加工台的 Z 軸可活動範圍較廣，可以用來形成較大的成品。

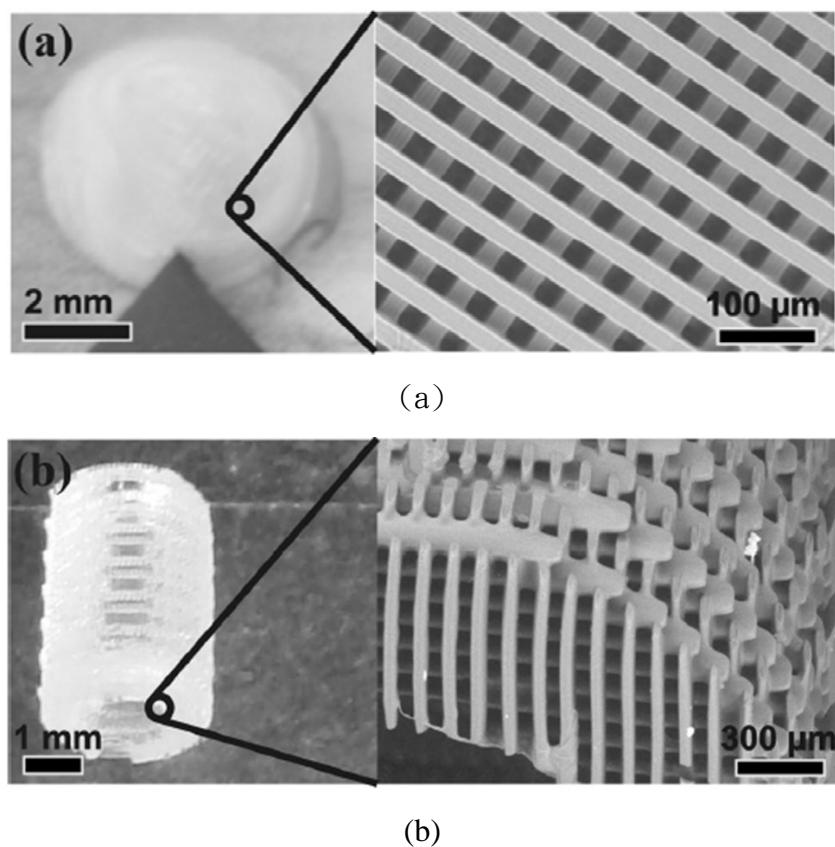


圖 2.18 利用 TPP 微製造技術所製作之微結構[21]



2.5 Dark Cure

在光固化成型技術中，樹酯吸收特定波長的紫外光源反應並固化，因為光場疊加或是光源強度太強導致列印時產生多餘的成化現象，在此稱之為 Dark Cure。若要避免此現象產生，在進行 3D 列印時需要調整許多參數來去除 Dark Cure 現象，例如樹酯配方、曝光時間、影像灰階值等等。

2012 年，David Dean 等人[22]在研究中為了降低 Cure depth 現象，嘗試使用多種生物性相容染料 AmphotericinB、Doxycycline Hyclate、Rutile Titanium Dioxide，以及具有毒性的 Yellow Chromium Azo Dye 來做測試並比較，如圖 2.19 所示，染料 Yellow Chromium Azo Dye 對 Cure depth 的影響最大，而生物性相容染料中，AmphotericinB 和 Rutile Titanium Dioxide 的影響效果是相對較好的。

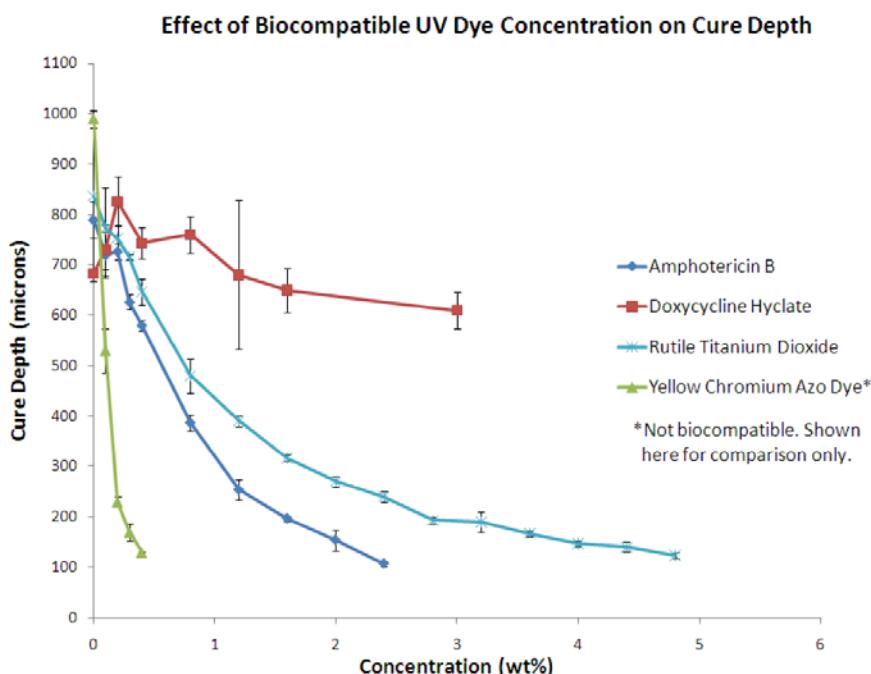


圖 2.19 Cure Depth 與不同染料之濃度比較關係圖[22]

2014 年，Jonathan Wallace 等人[23]在研究中調整高分子材料 Poly(propylene fumarate) (PPF)與單體 Diethyl fumarate(DEF)混合的比例，比例從 1:1(PPF/DEF)到



2:1，以及調整染劑 TiO_2 與光起始劑 BAPO 在當中的含量，使印製出來之成品沒有多餘的 Dark cure 現象，控制在 X-Y 平面上的列印精度。

2016 年，Eric J. Mott, Mallory Busso, Xinyi Luo, Courtney Dolder, Martha O.Wang, John P. Fisher, David Dean 等人[24]以 DMD 晶片系統的方式進行 3D 列印研究，並嘗試使用不同方法來改善水平方向的 Dark cure 以及深度方向 Cure depth(C_d)。研究中使用 poly(propylene fumarate)(PPF)作為基材，並在其中添加 bisacylphosphine oxide (BAPO)當作光起始劑、色素 titanium dioxide (TiO_2)以及染料 hydroxy-4-methoxybenzophenone(HMB)，並調整三者比例來去除 Dark cure 現象。實驗中印製正方形圖案，如圖 2.20 所示，未加入 HMB 所印製出來之正方形四周有圓弧狀即為 Dark cure 現象，加入了 HMB 後使 Dark cure 現象消失而呈現清楚之正方形圖案。在深度方向之 Cure depth 也因為加入的 HMB 與 BAPO 與 TiO_2 比例不同而有所影響，實驗中在 BAPO 含量 1%、2%、3% 的情況下分別測試 HMB 含量 0%~30% 以及 TiO_2 含量 0%~3% 對 Cure depth 之影響，圖 2.21 為 BAPO 含量 3% 的情況下的實驗結果，從結果中可以看到，不管是提高 HMB 或是 TiO_2 的含量都可以減少 Cure depth 的現象。

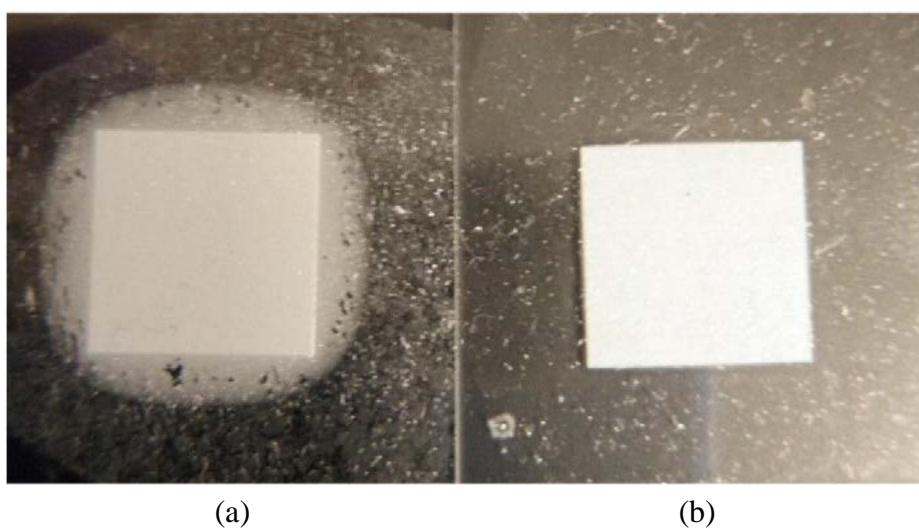


圖 2.20 添加染劑 HMB 前(a)後(b)比對圖[24]

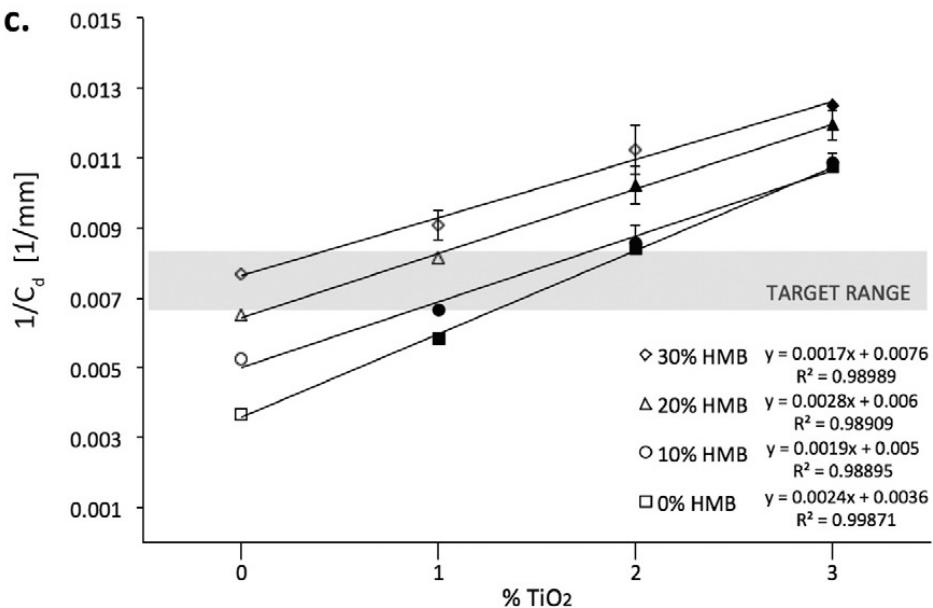


圖 2.21 添加 3%BAPO 及不同比例的 HMB 與 TiO_2 對 Cure depth 之影響[24]

第三章 實驗架設與設備

3.1 系統架構

本研究所架設的系統主要分為投影機改裝、顯微物鏡及 CCD(Charge Coupled Device)影像對焦系統，利用此系統進行 3D 列印，選用樹酯並調整曝光時間及影像灰階參數列印結構。

3.1.1 投影機

本研究使用投影機型號 ACER P1500，採用 DarkChip 3 DMD 晶片，解析度為 1920×1080 ，本實驗室之前成功將鏡頭改裝，可將投影面積縮小至 $4.3\text{mm} \times 2.42\text{mm}$ 。但因為顯微物鏡的入光口孔徑太小，若要將光場全部投入物鏡中，還要再把投影面積縮小。依據 DMD 投影成像原理，投影機之鏡頭可視為一凸透鏡(Lens)，如圖 3.

2 所示，DMD 位於凸透鏡左側 d_1 時，投影畫面 W 會在距離凸透鏡右側 d_2 處成像，若移動 DMD 靠近至凸透鏡左側 d'_1 時，投影畫面 W' 會在距離凸透鏡右側 d'_2 處成像。DMD 與凸透鏡之間距離縮短，會使投影放大；反之若增加 DMD 到凸透鏡之間的距離則會縮小畫面。將投影鏡頭拆下後，如圖 3.3 所示，投影機內部光源經 DMD 晶片反射後由鏡頭(入光口)進入，並由鏡頭(出光口)投影出來。鏡頭改裝後為了將延伸的套筒固定在投影機上，套筒一端設計成與鏡頭固定座相同之造型，如圖 3.4 所示，套筒 c 之尺寸與孔位設計與鏡頭入光口處的固定座相同，套筒 a 之內徑設計成可夾持鏡頭(出光口)，鏡頭裝上後使用螺絲從兩側定位孔固定以避免鏡頭滑動，套筒 a 與套筒 b 為可延伸一長度之結構設計，兩者使用螺絲固定。加工完成後，套筒 c 先用螺絲鎖在投影機上固定，再將已固定好的套筒 a、b 與投影鏡頭裝在套筒 c 上，並將套筒 b 與套筒 c 使用螺絲從定位孔固定，組裝後示意圖如圖 3.5 所示。



圖 3.1 投影機 ACER P1500

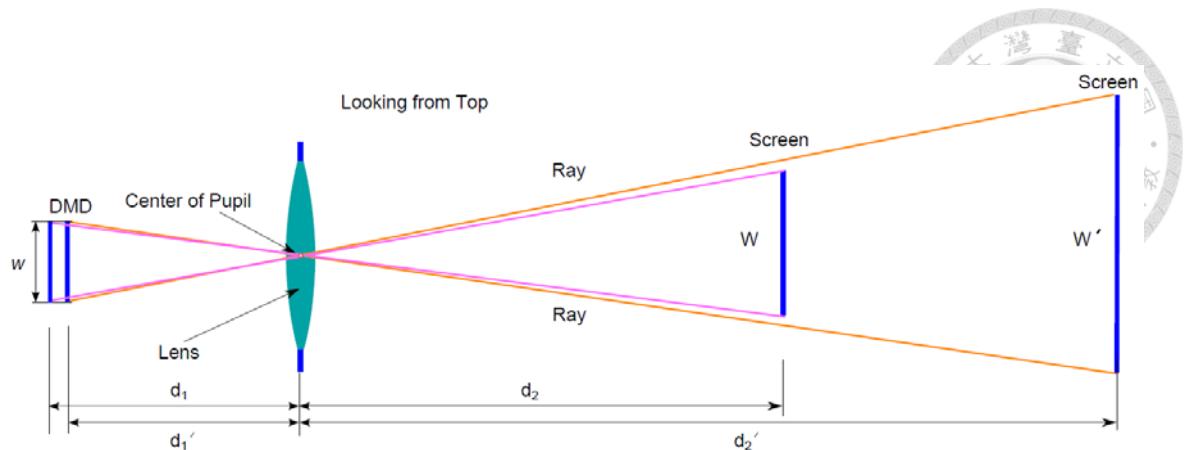


圖 3.2 投影面積隨 DMD 與透鏡之間距離變化[25]



圖 3.3 投影機鏡頭

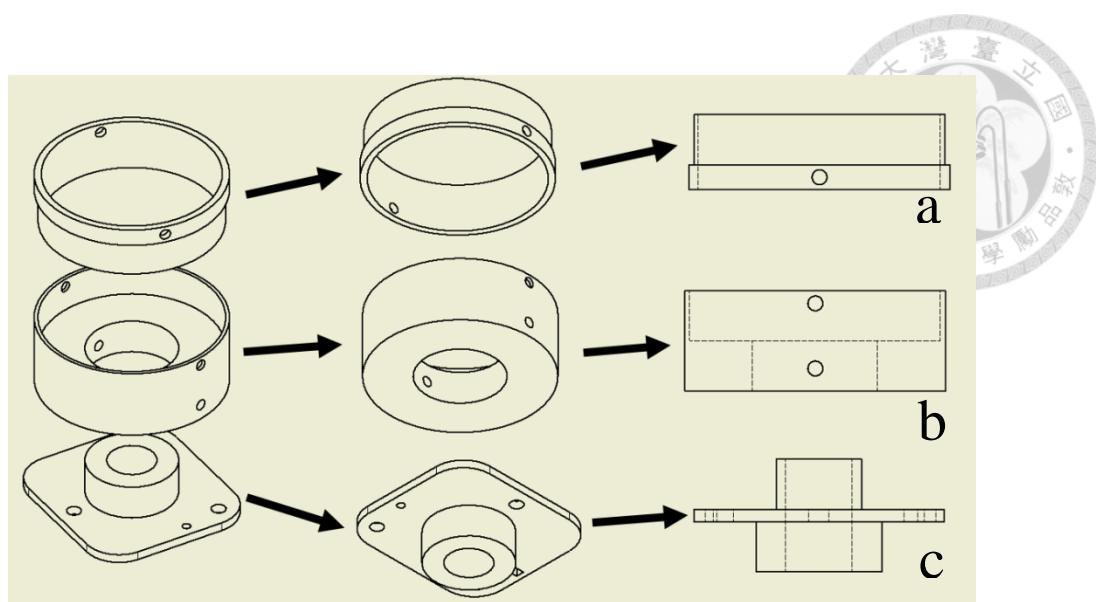


圖 3.4 投影機鏡頭改裝之套筒

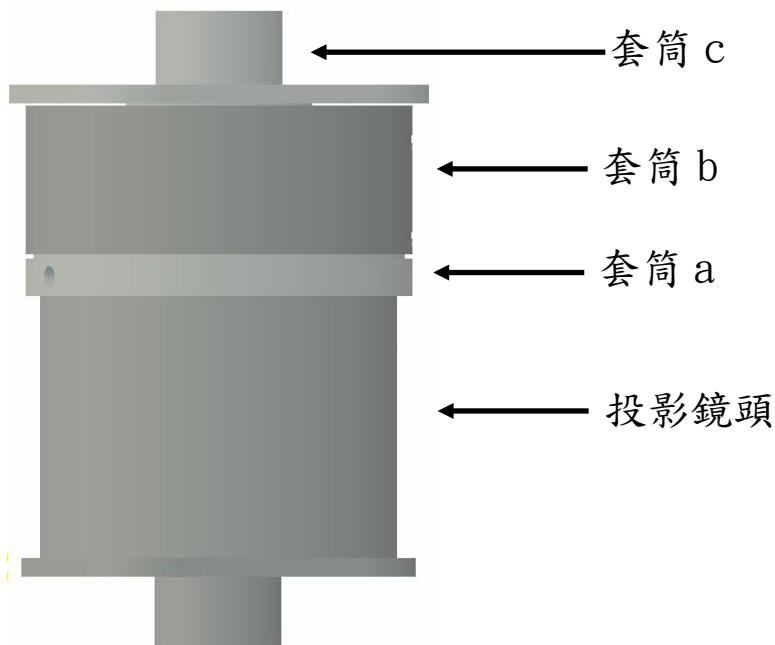


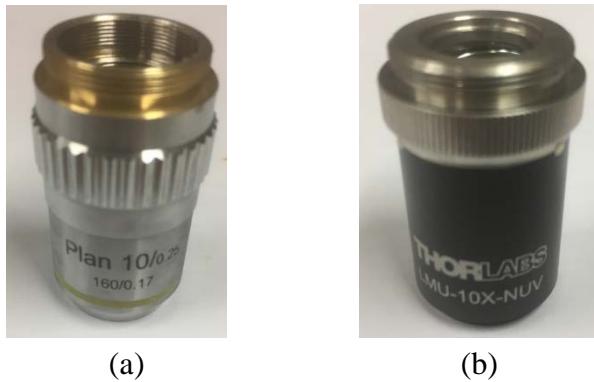
圖 3.5 套筒與投影鏡頭組裝示意圖

3.1.2 顯微物鏡

一開始在做投影機縮影測試時，先嘗試使用一般的光學凹凸透鏡，利用透鏡組的方式來將投影畫面縮小，但因為透鏡之焦距不足導致無法將已縮小之投影畫面再次縮小至理想的大小範圍。因此嘗試直接使用顯微物鏡，得到不錯的縮影效果，最後實驗選用 10 倍平場物鏡，N.A 值 0.25，如圖 3.6(a)所示，作為縮小投影面積



之物鏡。並選用同樣放大倍率之物鏡 LMU-10X-NUV，N.A 值 0.25，如圖 3. 6(b) 所示，作為 CCD 前聚焦之物鏡。



(a)

(b)

圖 3.6 (a) 平場 10 倍物鏡 (b) LMU-10X-NUV

3.1.3 CCD 對焦系統

因為將投影畫面縮的太小，無法以肉眼或放大鏡直接觀看對焦情形，又因為本實驗採用 DLP 光固化上照式的方法，每次進行 3D 列印前都要重新對焦，因此對焦的方法極為重要。在此開發了一套對焦系統，利用 CCD 影像即時監測的方法，搭配顯微物鏡即可將觀測的視野縮小，再由電腦即時觀測實際的對焦情形，以下將對此系統做進一步的介紹。

3.1.3.1 CCD 介紹

CCD(Charge Coupled Device，感光耦合元件)，是一片可以記錄光線變化的矽晶半導體，分為三層(1)微距鏡頭(2)濾色片(3)感光基板，如圖 3.7 所示。主要是由感光基板接受光源強度轉成電子訊號，再將訊號傳送到影像處理晶片，最後由電腦軟體顯示畫面。本實驗使用型號 EO USB 2.0 CCD Machine Vision Cameras，由 Edmund 廠商生產製造。

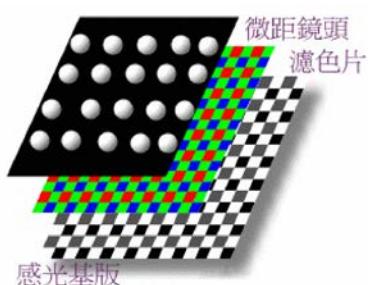


圖 3.7 CCD 感光元件內部架構[26]



3.1.3.2 軟體介紹

本實驗使用 uEye Cockpit，軟體下載自德國 IDS(Imaging Development Systems GmbH)公司，因接收到的投影光源太亮以及閃爍導致無法觀測，故調整其內部設定以利觀察投影畫面，如圖 3.8 所示，調整畫素時脈至 27MHz(每組畫素抵達影像擷取卡的頻率)與幀率至 14.98fps(掃描速度)以降低畫面的閃爍效果，調整曝光時間到最低 0.009ms 使擷取的影像亮度降至最低[27]。



圖 3.8 uEye Cockpit 軟體設定



3.1.3.3 工作原理

CCD Camera 前搭配一顯微物鏡，可得到一個距離物鏡 d_2 的對焦平面，如圖 3.9 所示。CCD Camera 與物鏡之間的距離 d_1 可以改變影像接收的範圍大小，選用適當倍率的物鏡和調整距離 d_1 可以控制想要的畫面大小。

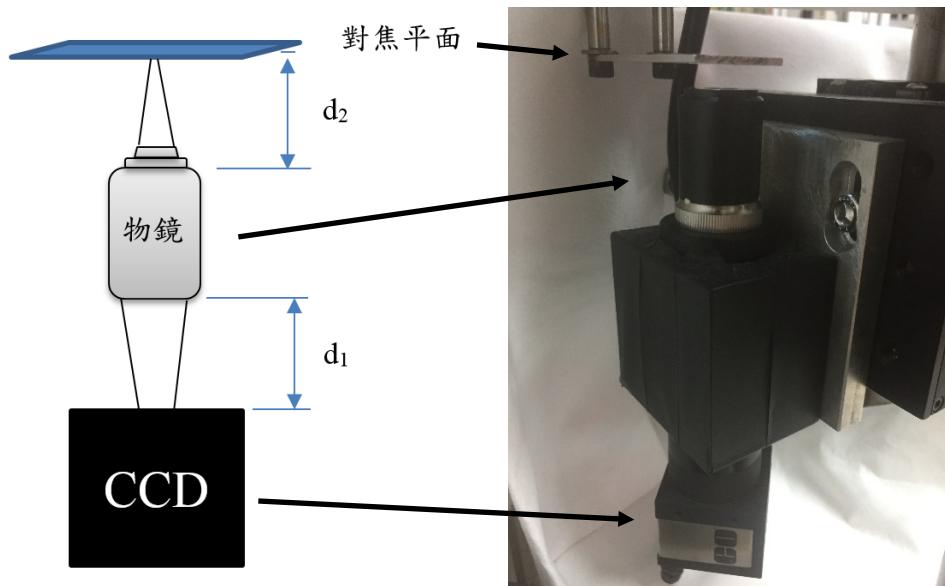


圖 3.9 CCD Camera 工作原理與實際架設圖

固定距離 d_1 後可以得到一固定位置 d_2 的對焦平面，而投影畫面經物鏡縮小後亦會得到一固定焦距的對焦投影平面 B，如圖 3.10(a)所示。當投影機對焦平面 B 與 CCD 對焦平面 A 重合時即可在電腦上得到清晰的對焦圖形，如圖 3.10(b)所示。

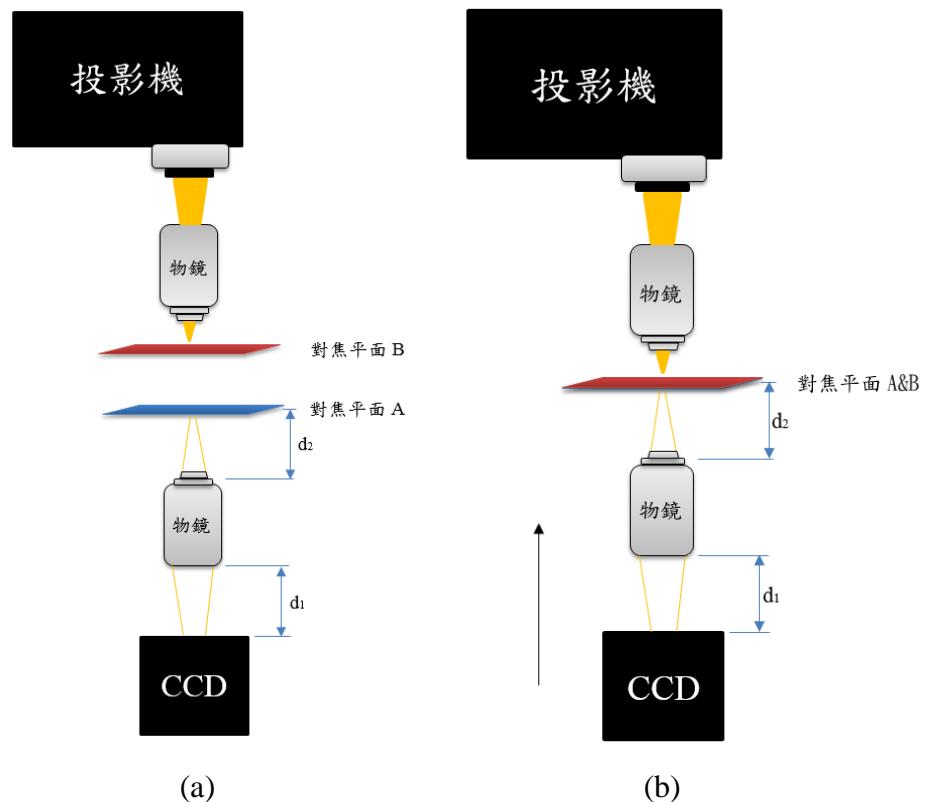


圖 3.10 (a)對焦平面 A、B 示意圖 (b)CCD 整組向上移動使對焦平面 A、B 重合

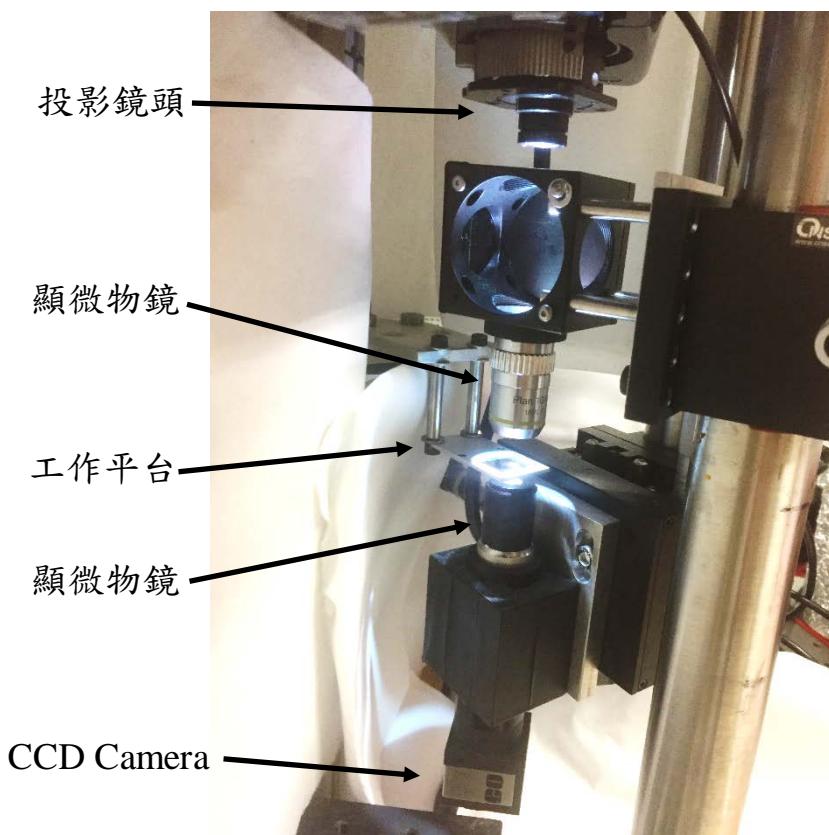


圖 3.11 實際對焦情形



3.1.3.4 校正與對焦

CCD Camera 經微調對焦後，可以從電腦上觀測校正用網格紙，CCD Camera 本身的解析度為 1280×1024 ，計算後得到每單位像素大小為 $1.211 \mu\text{m}$ ，設定 uEye Cockpit 內建的像素尺寸以用來量測縮小後的投影面積。

尺寸校正完成後就可以進行先前所述的對焦方法，因為投影機與顯微物鏡的距離是固定不動的，只能移動下方的 CCD 來讓對焦平面 A、B 重合，如圖 3.10 所示。先給電腦一張用來對焦的網格圖案，如圖 3.12 所示，讓投影機投出到對焦平面 A 上，再利用微調平台調整 CCD 的位置直到網格的線條從模糊變成清晰，如圖 3.13 所示，即達到讓對焦平面 A、B 重合的目的。由 uEye Cockpit 量測實際投影面積為 $1.454 \times 0.810 \text{mm}^2$ ，投影機解析度為 1920×1080 ，最小理論解析度約為 $0.757(\mu\text{m}/\text{pixel})$ 。從圖 3.13 可以看到光場右下方較亮且線條較粗，可從影像判定為光場較強處。

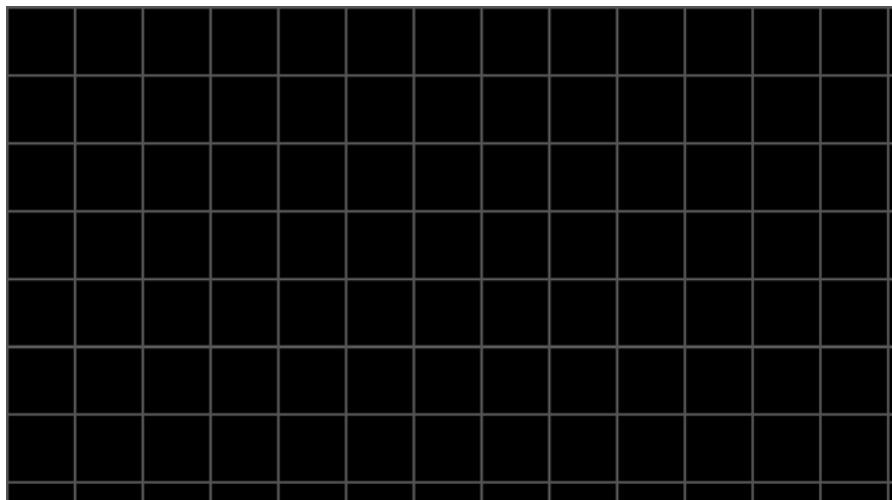


圖 3.12 對焦用網格圖案

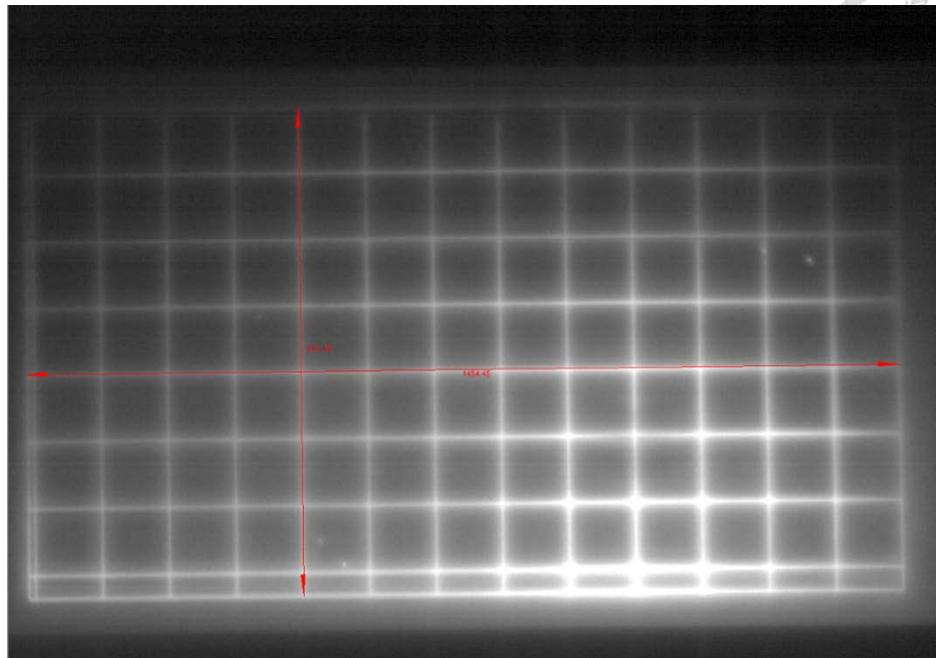


圖 3.13 CCD 觀測對焦網格

當投影機對焦平面 A 與 CCD 對焦平面 B 重合後，再來就是將移動平台上放置玻片用來列印的建構平面 C 與對焦平面 A、B 重合，如圖 3.14 所示，即可完成對焦。實驗中發現如果直接使用透明玻片在對焦區域上下移動，無法從 CCD 觀測出明顯變化，亦無法得知平台是否對焦，因此在透明玻片上貼上一層 3M 的霧面膠帶，貼上膠帶的玻片因為它的不完全透光會使投影出來網格圖案變得模糊，平台經多次上下調整後，於某一定點可得一最清晰之網格畫面，即為平面 C 與 A、B 重合之位置，如圖 3.15 所示。若平面 C 未與 A、B 重合，CCD 撷取到的畫面會是較模糊的網格畫面，如圖 3.16 所示，平台自對焦平面向上及向下分別移動 0.1、0.2mm 後之影像擷取畫面，當平台離對焦平面越遠畫面就越模糊。

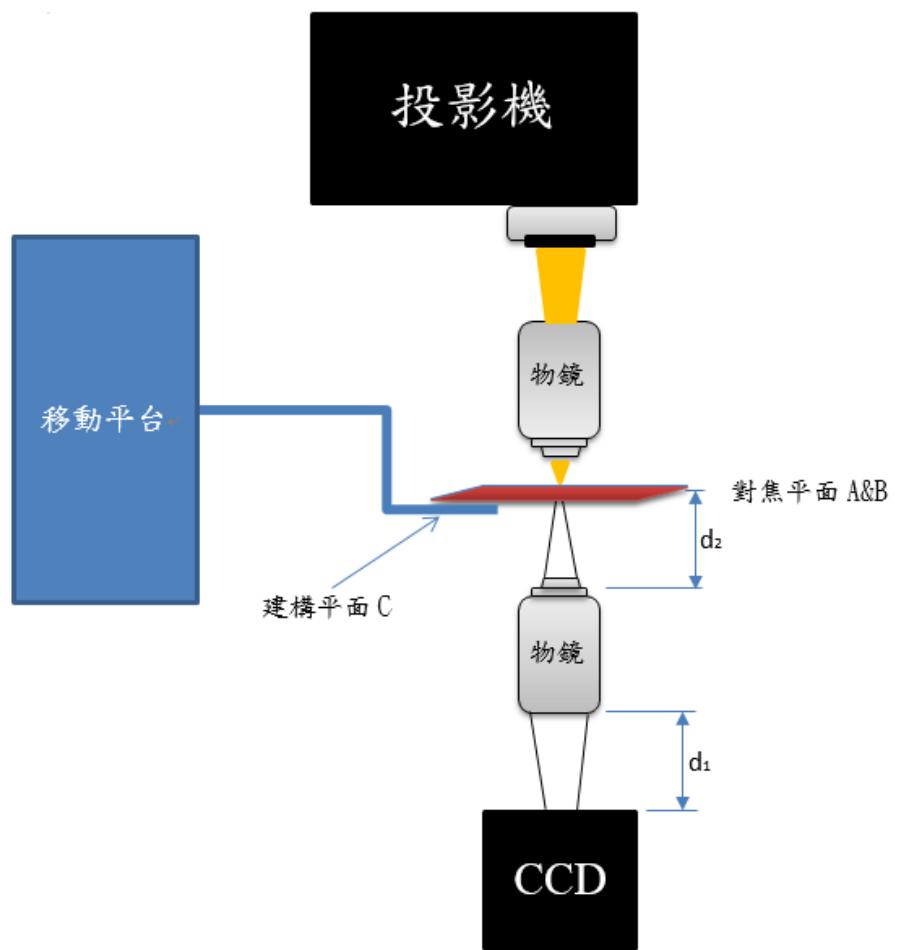


圖 3.14 建構平面 C 與對焦平面 A、B 重合示意圖

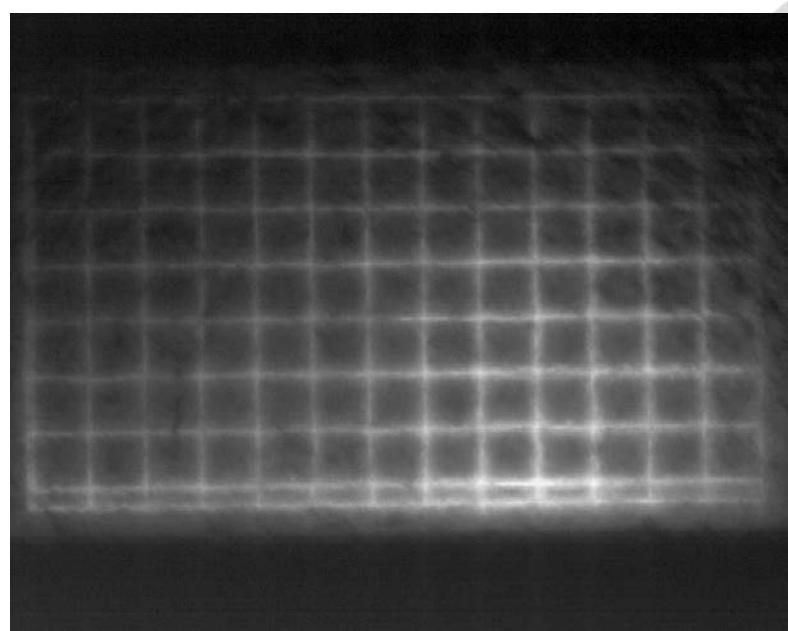


圖 3.15 玻片貼上膠帶後與對焦平面重合之畫面

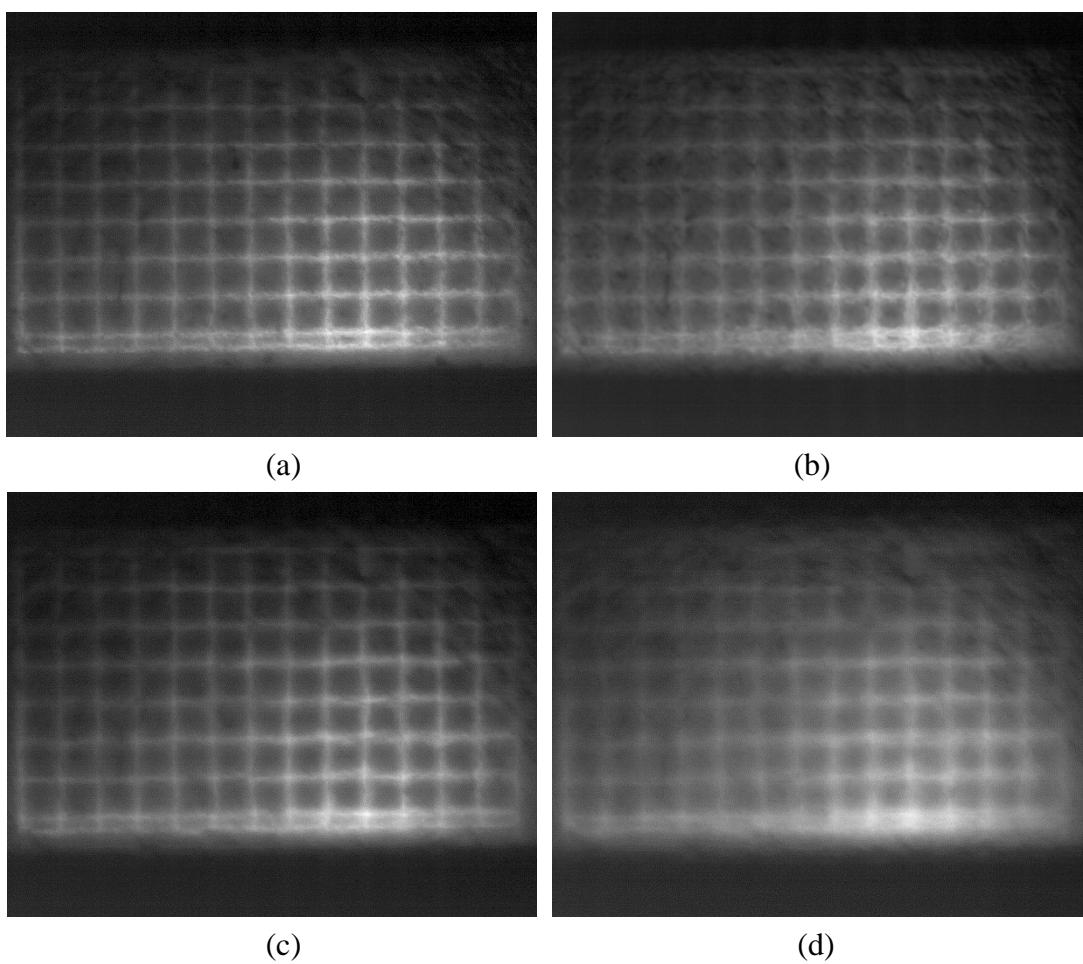


圖 3.16 玻片貼上膠帶後自對焦平面 (a) 上移 0.1mm (b) 上移 0.2mm (c) 下移 0.1mm(d)下移 0.2mm



3.1.4 移動平台

平台採用 VEXTA 步進馬達型號 PH266-01，如圖 3.17 所示。利用 Solartron Metrology Differential LVDT 位移計，搭配 NI-6009 和 LabVIEW 程式來量測工作平台移動精度。校正平台使用針盤指示量規(dial gage)，如圖 3.18 所示，測量實際位移和輸入位移的準確度，程式設定讓平台由上而下每步位移 0.1mm，得到實際位移是輸入位移的 1.1177 倍，如圖 3.19(a)所示。再校正 LVDT 電壓與實際位移的關係，可得到電壓與實際位移的比 0.6842(V/mm)，如圖 3.19(b)所示。

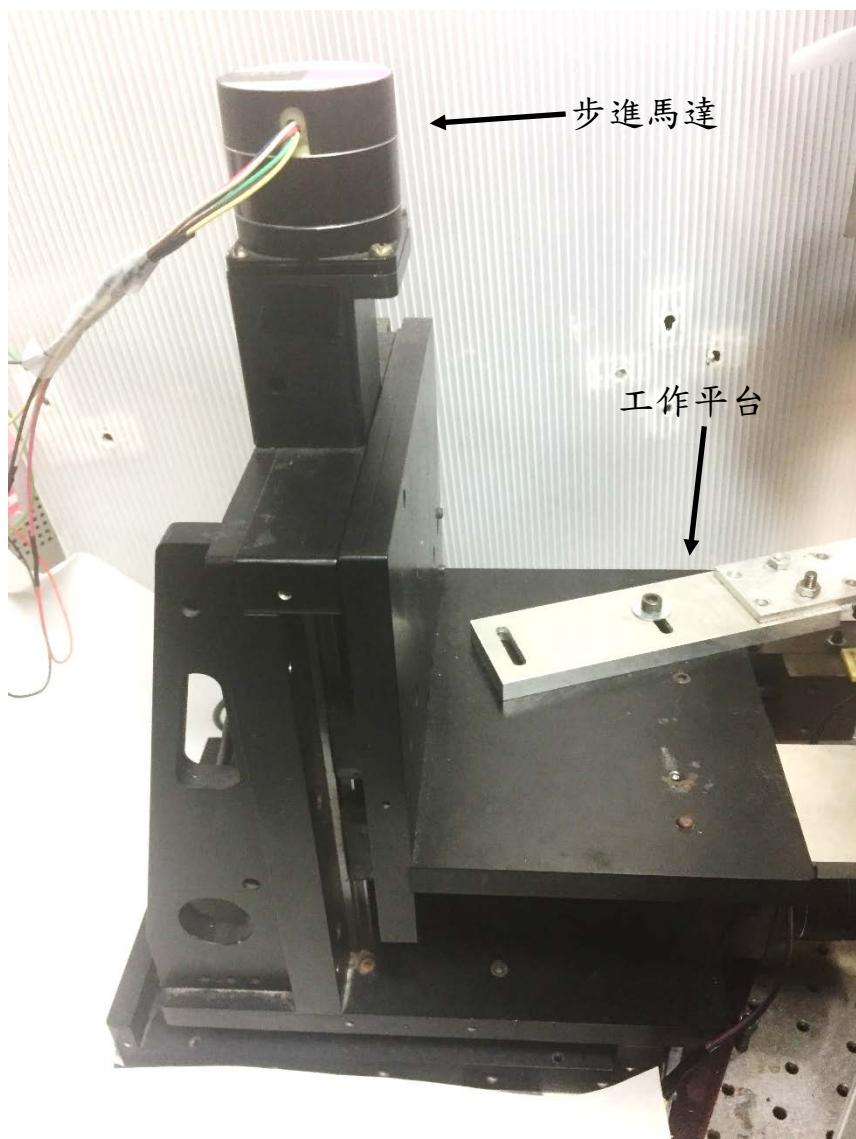


圖 3.17 移動平台



圖 3.18 針盤指示量規

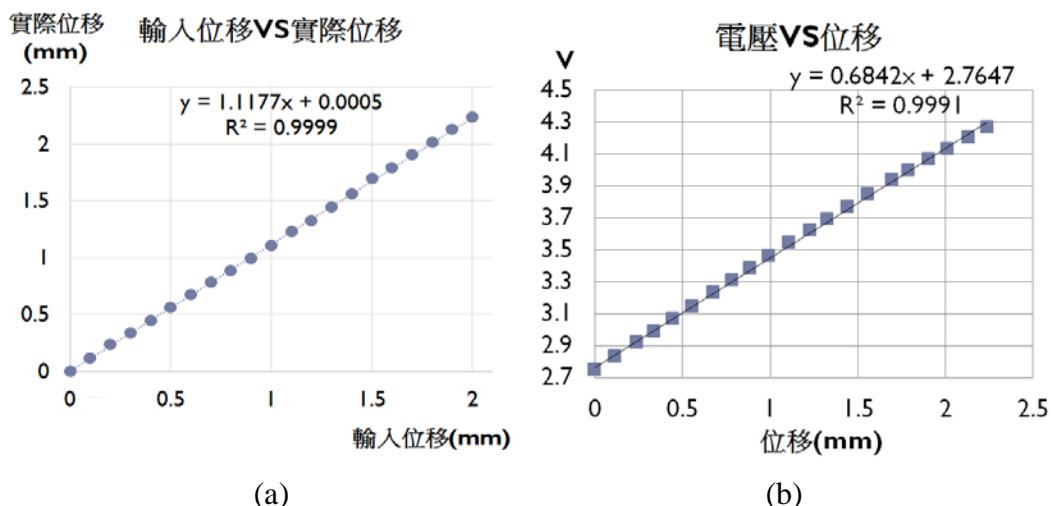


圖 3.19 LVDT 校正曲線(a)輸入位移與實際位移之關係曲線(b)電壓與實際位移關係曲線

校正完 LVDT 後，接著測試平台的最小可移動量與精度，由程式設定每步位移分別為 $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ ，輸入指令間隔五秒，每秒記錄一次，平台移動間格時間內會擷取到五個電壓值，取中間三點做平均後與時間做圖，如圖 3.20 所示，再將記錄到的電壓值除以 $0.6842(\text{V/mm})$ 可得實際位移量，程式設定的位移量乘以 1.1177 定義為輸入位移。從圖中可以發現讓平台每步移動 $1\text{、}2\mu\text{m}$ 時，平台未依電腦指令移動，每輸入兩到三次位移訊號，平台實際動一大步；而每步移動 $3\mu\text{m}$ 時，平台會依照指令移動，但每次移動量較不穩定， $4\text{、}5\mu\text{m}$ 的位移量較為穩定。依據此校正結果，實驗時可依參數設定調整每層最小厚度 $3\text{~}5\mu\text{m}$ ，列印出來的成品實際高度約為程式設定高度的 1.12 倍。

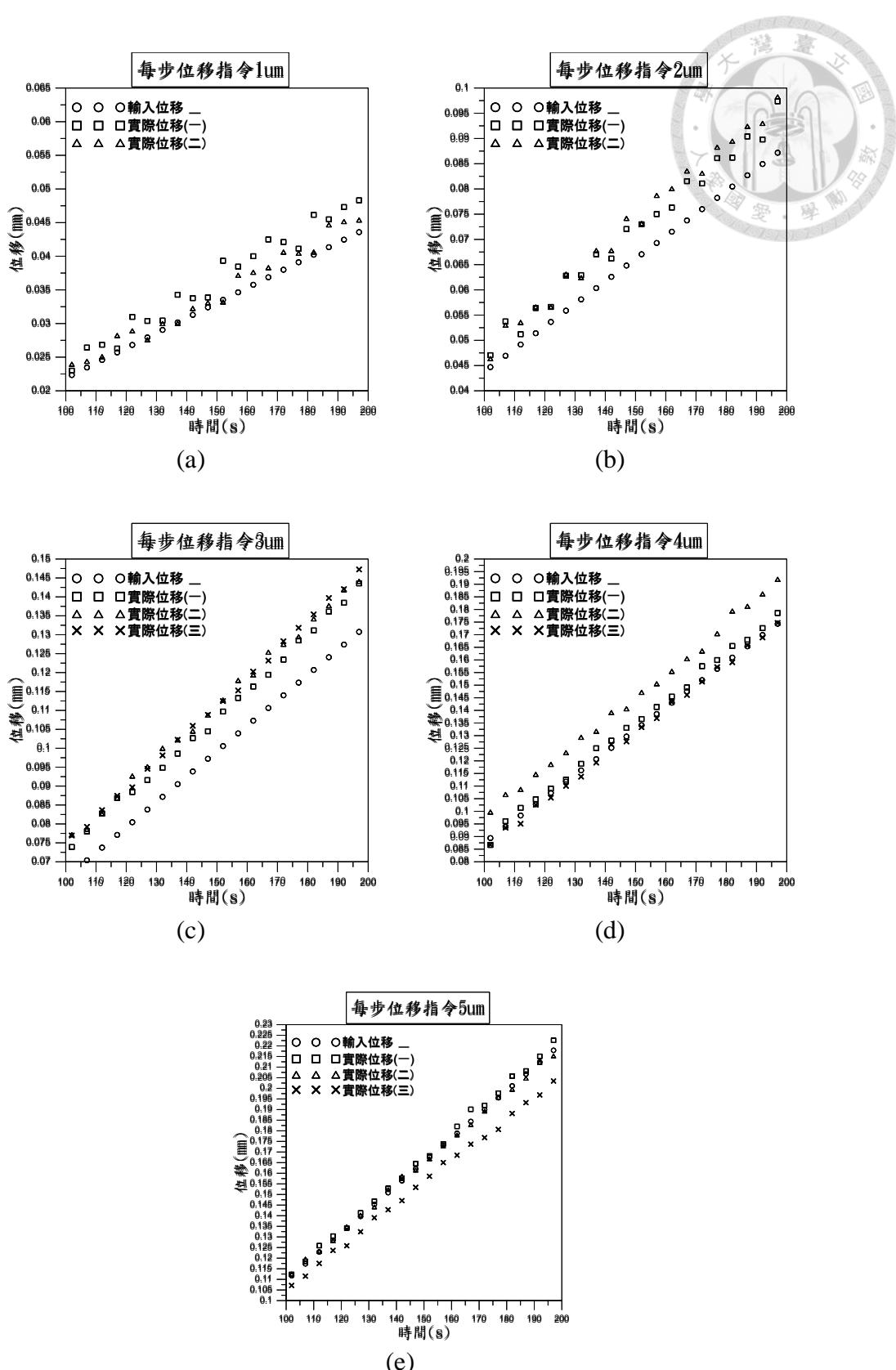


圖 3.20 每步位移(a) $1\mu\text{m}$ (b) $2\mu\text{m}$ (c) $3\mu\text{m}$ (d) $4\mu\text{m}$ (e) $5\mu\text{m}$ 之實際位移-時間關係圖



3.2 實驗相關設備

3.2.1 超音波震盪機

型號 DELTA DG1，盪頻率 43KHz，將印製完成的試片放入裝有酒精的燒杯中，將燒杯置於超音波震盪機並隔水震盪，每次時間約 5 分鐘。



圖 3.21 超音波震盪機

3.2.2 磁石攪拌機

型號 HTS-AL-HTS1003，可同時加熱及攪拌，樹酯條配在常溫下攪拌不需用到加熱功能溫度加熱範圍 60~420 度，轉速 60~1500 rpm，將磁石放入配好的樹酯燒杯中，再將燒杯放置於攪拌機上，攪拌扭轉至第五格並攪拌 5 個小時以上。



圖 3.22 磁石攪拌機



3.2.3 電子顯微鏡 SEM(Scanning Electron Microscope)

廠牌 JEOL，型號 JSM-6360，因為印製的試片不具有導電性，需將試片拿去濺鍍機 (Sputter)，型號 JUNSUN MGS-500，鍍上鈦後放入 SEM 拍照。



圖 3.23 電子顯微鏡

3.2.4 立體顯微鏡

印完的試片用酒精清洗過後放置於顯微鏡下觀察，可將目鏡拆下換上 CCD Camera 或搭配套筒裝上相機拍照，如圖 3.24 為 CCD Camera 裝在顯微鏡拍照。

表 3.1 顯微鏡規格

目鏡	10X
物鏡	0-4.5X
平台	96 x 76mm，XY 方向移動式
鏡筒	三眼鏡筒，傾斜 45 度
燈源	外加式 LED 燈源



圖 3.24 立體顯微鏡搭配 CCD 拍照系統

3.2.5 金相顯微鏡搭配相機

金相顯微鏡型號 Nikon Optiphot-100 搭配相機 Canon EOS kiss X3，放大倍率有 55X、110X、220X、550X、1100X 可供調整，試片拍攝大多使用 110X、220X。



圖 3.25 金相顯微鏡&相機



3.2.6 恒溫恒濕箱

本研究使用天宜科技有限公司所生產的可程式控制恒溫恒濕箱，型號為 TTH-B1TP-S，如圖 3.26 所示。其使用 TH300 可程式溫濕度控制器，利用 P.I.D 自動演算法執行溫濕度的回溯控制，並可設定升降溫速率，其溫度可控制範圍為 0°C - 200°C，濕度可控制範圍為 25 % R.H. – 95 % R.H.，內箱尺寸 W 60 × D 40 × H 50 cm。實驗中使用此設備將印製好的試片作後處理，在不同溫度下進行熱處理。



圖 3.26 恒溫恒濕箱

3.2.7 UV 紫外光燈

實驗使用的光敏樹酯在吸收特定範圍波長的紫外光源後會反應成化，因此使用紫外光燈對印好的試片進行二次曝光固化。本研究使用 UV 紫外光燈為美國 UVP 公司所生產的 UVGL-25 手提式紫外光燈(Compact UV Lamp)，如圖 3.27 所示，功率 4W，長波長(long wave)365nm，短波長(short wave)254nm。



圖 3.27 UV 紫外光燈



3.3 樹酯選用

本實驗選用荷蘭 Fun To Do 公司生產的 Deep Black 光敏樹酯，這款樹酯中加入了接近奈米等級的碳粒子，可印出高分辨率的物件。



圖 3. 28 Deep Black 光敏樹酯

樹酯配方命名

本實驗使用之樹酯 Deep Black 因為對投影光的靈敏性太高容易過度成化，故在樹酯中加入蘇丹 I(1-苯基偶氮-2-萘酚)，為一種人工合成之工業染料，作為紫外光吸收劑，可吸收過多的紫外光，並與 Deep Black 樹酯在磁石攪拌機高速旋轉下混合，藉由調整蘇丹的含量來吸收因光場高斯分布重疊累加所產生能量較高的雜光，避免它產生過度成化。Deep Black 樹酯在此簡稱為 DB，實驗中因調配不同比例的配方，在此依蘇丹的含量由低而高編排，如表 3. 2 所示。



表 3.2 列印樹酯配方表

命名	Deep Black	Sudan	命名	Deep Black	Sudan
DB0	80 ml	0g	DB6	80 ml	0.26 g
DB1	80 ml	0.1 g	DB7	80 ml	0.3 g
DB2	80 ml	0.15 g	DB8	80 ml	0.35 g
DB3	80 ml	0.18 g	DB9	80 ml	0.4 g
DB4	80 ml	0.2 g	DB10	80 ml	0.45 g
DB5	80 ml	0.22 g			

3.4 三點彎曲試驗相關設備

本研究採用三點彎曲的試驗方式來測量列印的結構機械性質，測試主要分為力量與變形量兩種，因為沒有現成且符合本實驗尺寸之彎曲試驗機，在此自行設計一套三點彎曲試驗機，選用適合之 Load Cell 來記錄受力情形，LVDT 來記錄試片彎曲的變形量。試驗機設計受力點與兩支點使用直徑 0.57mm 之針頭，兩支點間距 6mm，可量測變形深度 5mm，如圖 3.29 所示。試驗機架設模擬如圖 3.30 所示，將 Load Cell 固定在平台下方，並在 Load Cell 受力處黏上一探針以用來感測試片受力情形。依設計圖實際加工架設後如圖 3.31 所示。

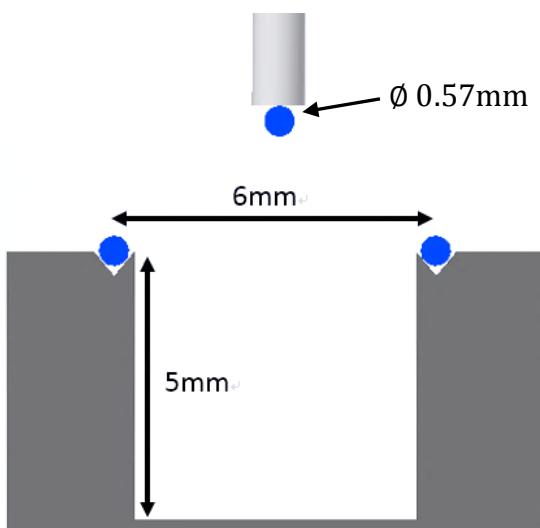


圖 3.29 三點彎曲試驗機尺寸設計圖

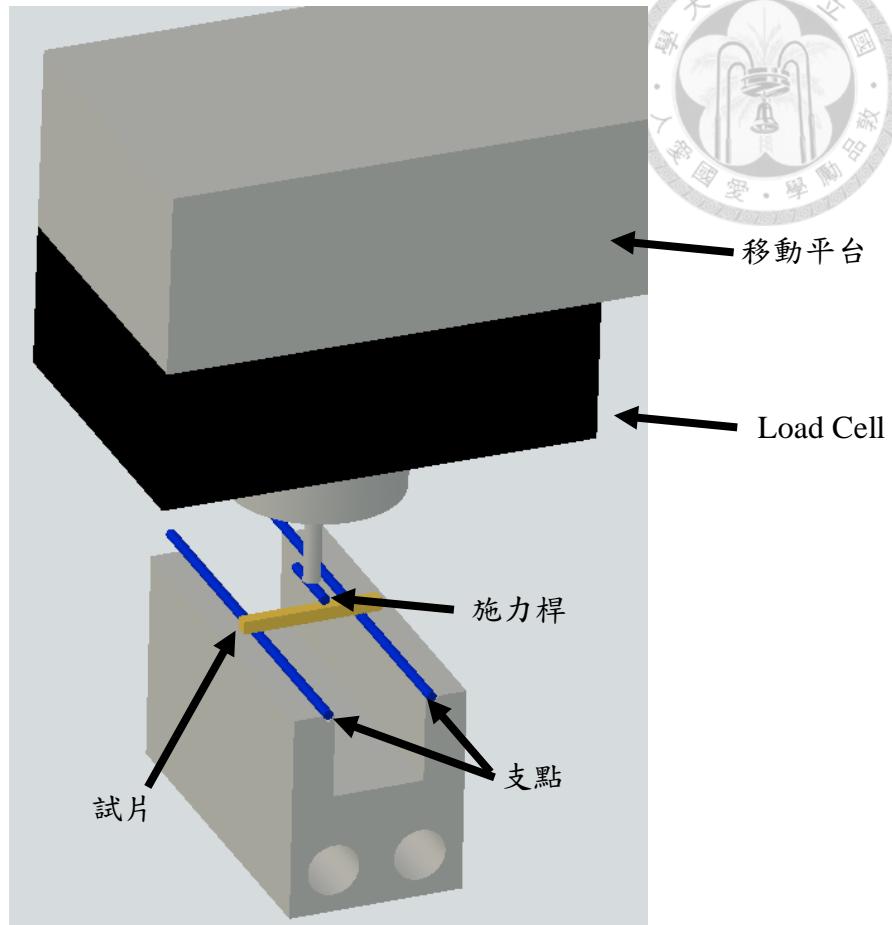


圖 3.30 試驗機架設模擬示意圖

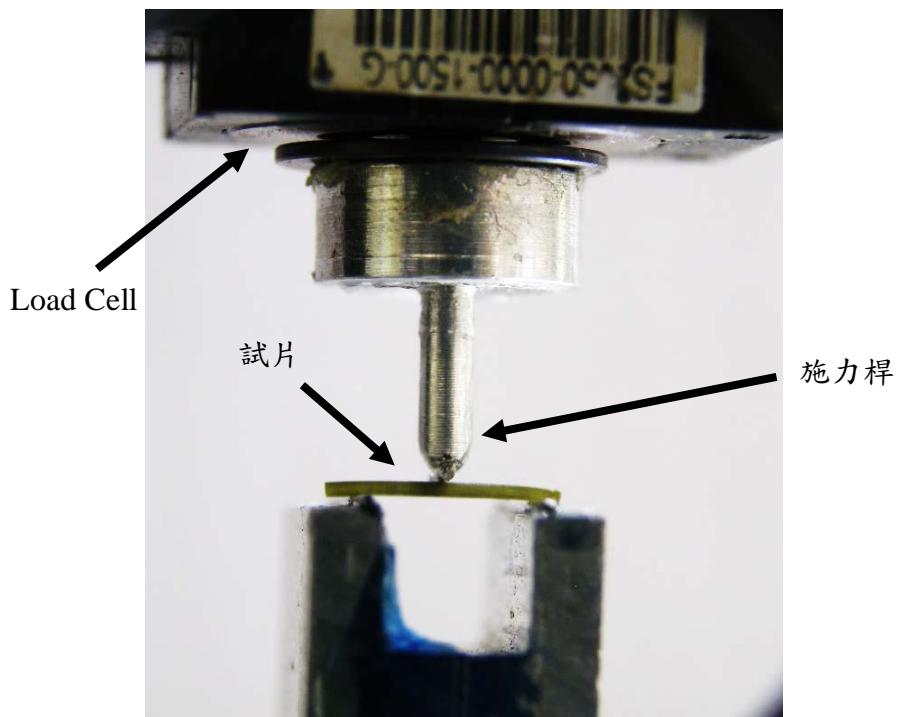


圖 3.31 三點彎曲試驗機實際架設情形



3.4.1 Load Cell

本研究使用 TE Connectivity 的 Low Force Compression Load Cell，如圖 3. 32 所示，型號 FS2050-0000-1500-G，最大負重可達 1500gw，其他使用規格如表 3.3。



圖 3. 32 Load Cell 型號 FS2050-0000-1500-G

表 3. 3 Load Cell 規格

Supply Voltage	5V
Zero Force Output	1±0.05 V
Operating Temperature	0~70°C
Storage Temperature	-20°C~+85°C
Weight	5.31g

實驗前先使用 NI-6009 和 LabVIEW 程式校正 Load Cell 的輸出電壓與所測得的力量之關係，在此使用 1 公斤重的砝碼校正，並得到電壓(伏特)與力量(牛頓)之關係為 5.14(N/V)。



3.4.2 LVDT

校正如同 3.1.4 小節的校正方法，在此不再多作詳述。校正完後可根據量測到的電壓值轉換成平台的位移量，藉此得知試片在彎曲時的實際變形量。



圖 3.33 LVDT

3.4.3 試驗流程

本研究利用三點彎曲試驗方法來測試印製的結構之機械性質，需同時偵測力量與位移的變化，在此使用 LabVIEW 程式搭配 NI-6009 可同時記錄 Load Cell 與 LVDT 的電壓值變化，程式方格圖如圖 3.34 所示，將記錄到的力量、位移電壓值與時間數據放進 Excel 處理，由先前校正得到之參數計算後，最後利用 Grapher 畫出力量與位移之關係曲線。

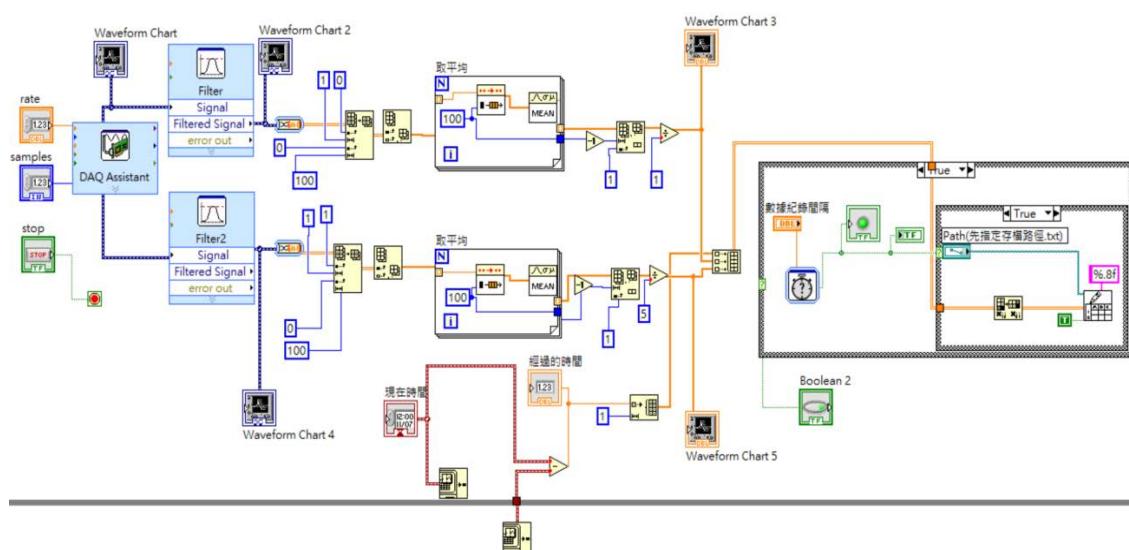


圖 3.34 Load Cell 與 LVDT 同時記錄之 LabVIEW 方塊圖



本試驗主要分為四個步驟，如圖 3.35 所示，(a)將待測試片放置在下方兩支撐點上 (b)再用電腦控制平台使 Load Cell 和探針下移接觸試片 (c)試片彎曲至一定程度後停止 (d)將平台向上移動讓探針離開試片。

進行三點彎曲試驗時，Load Cell 加載速度設定為 30mm/min、每 0.1 秒擷取一次電壓值並記錄之。

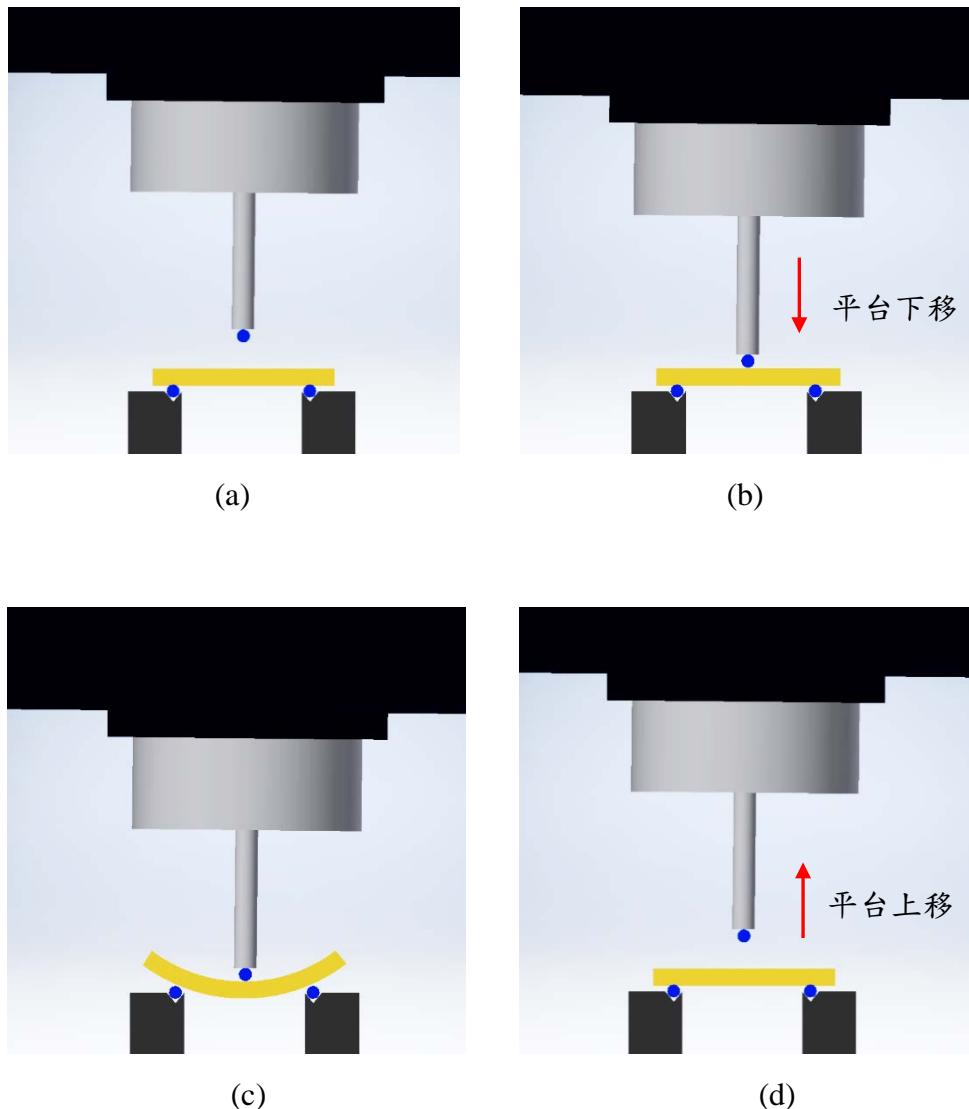


圖 3.35 三點彎曲試驗步驟示意圖



第四章 實驗方法與分析

4.1 實驗方法與流程

本研究採用 DLP 光固化上照式的方法進行 3D 列印，列印步驟如圖 4.1 所示，首先繪製要列印的 3D 模型，轉成 stl. 檔匯入切層軟體 Creation Workshop，並設定曝光時間與切層厚度等參數，利用 3.1.3 小節的 CCD 對焦系統進行對焦後，將玻片黏在平台上並浸入樹酯中，因為樹酯較黏稠表面張力大，在調整初始液面時用夾子將玻片表層的樹酯刮薄，避免因為初始液面太厚導致前幾層成化不良，後續印製之結構薄膜與玻片脫離。列印完成後取下玻片並使用酒精清洗，試片風乾後在顯微鏡下觀察結果，再依據印製出來的結果重新調整列印參數。

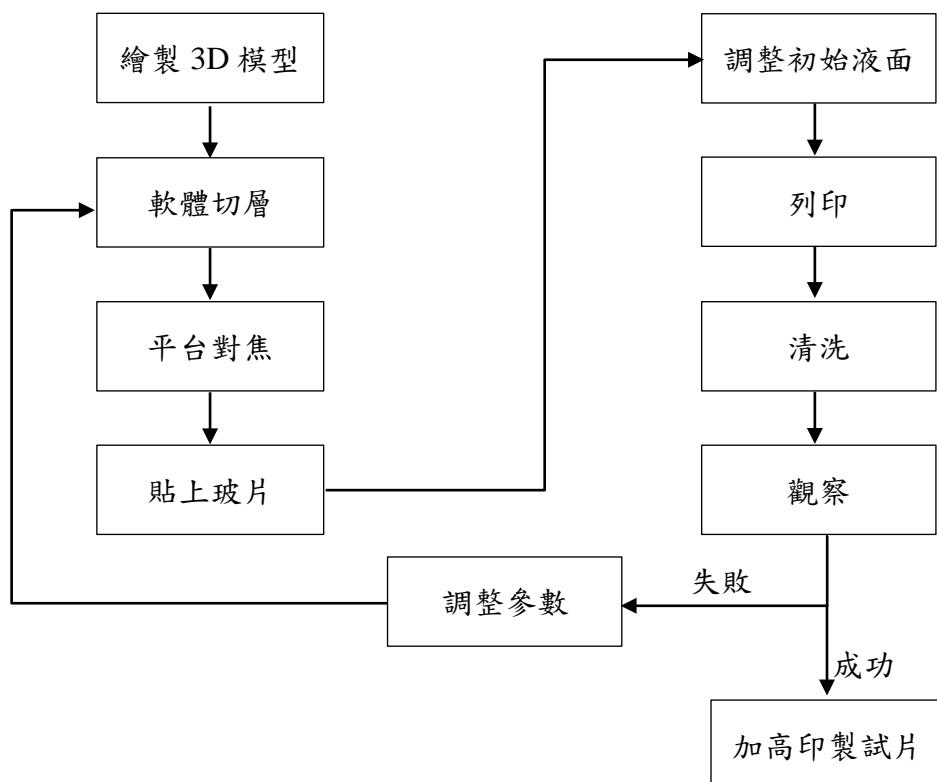


圖 4.1 3D 列印步驟流程圖



4.1.2 結構折斷方法

實驗中嘗試過許多方法去折斷結構以觀察結構內部是否通透，隨著尺寸的縮小及配方的改變，會影響結構之特性以至於無法順利折斷，故必須改善及提升折斷之技巧才能使斷面更加完整，在顯微鏡下觀測或拍照時才能清楚看到結構內部印製情形。

在此整理並詳細敘述折斷方法之改善過程，一開始在印製大尺寸結構時，結構在加高後可輕易的將其折斷，使用兩隻夾子夾住結構頭尾兩端彎折後即可將其折斷，無需再做其他處理。

隨著尺寸的縮小，可能是因為壁厚變薄或是蘇丹含量的提高，結構變得太軟以至於無法在一般的狀態下將其折斷，故嘗試將印製好之結構放入-20°C的冰櫃中2~3小時，冷凍後結構變得較脆，但因為結構離開冰櫃後整體回溫的速度很快，需要即時用夾子將其折斷，否則結構會回到原本較軟的狀態。

當尺寸縮得更小後，將試片置於冰櫃中 1~2 天也無法利用彎折的方式將結構折斷，推測是因為溫度不夠低而無法將其折斷，冷凍後用美工刀切斷容易破壞其結構斷面。故繼續嘗試其他方法，將試片置於烤箱中烤約 3~5 分鐘，結構整體變脆變硬，可使用夾子輕易地將其折斷，但從顯微鏡及拍攝的照片中發現，只要是使用烤箱烤過的結構其斷面都會有一層已成化之薄膜，因而無法判定結構是否在印製時就不通透，還是因為烤箱的溫度太高而導致薄膜產生，故使用烤箱烘烤結構不適合做為折斷之方法。

最後使用到液態氮，用夾子將結構頭尾兩端夾著並泡進零下 196°C 之液態氮中，結構在液態氮裡瞬間結凍變脆並可以輕鬆地將其折斷，在顯微鏡下觀察可以看到斷面有清楚的結構輪廓，並沒有因為折斷時壓壞而變形。故此為目前測試過的所有方法中最好的折斷方式，所有尺寸之結構皆可以利用此方式折斷，但也因為有一定的危險性，在液態氮中折斷時須要做好防護措施。



4.1.3 Post cure

對光敏樹酯而言，將其使用 UV 光照射或加溫皆能使其反應並固化，故實驗中使用兩種方法將印製出來之結構試片進行二次固化，目的在使其能成化的更完全，避免結構有成化不完全的狀況發生。

4.1.2.1 UV 光照射

使用紫外光燈照射試片，試片放置於一盒子內，並使用亮面鋁箔紙貼滿盒子內部，藉由鋁箔紙反射讓試片接收 UV 光的照射能更全面更均勻，但由於 UV 光之穿透能力有限，故有可能無法照射到結構內部，只有表面幾層會受到紫外光之影響。

4.1.2.2 恒溫恒濕箱中加熱

利用恒溫恒濕箱將試片在高溫中靜置，先使用控制面板將溫度控制在想要之溫度後，將試片放入恒溫恒濕箱，放置五分鐘後再將試片取出，放置試片的時間要控制的越短越好，以避免溫度下降太多。

4.2 Dark cure 分析

4.2.1 數位光學原理

本實驗使用 DLP 投影機，DMD 晶片反射投影光源經由投影鏡頭匯聚成一投影面，投影光點會在投影面上形成一個高斯分布的光場[28]，高斯分布光場模擬如圖 4.2 所示。實驗時使用 CCD 對焦系統觀測投影出來之影像，曝光圖案如圖 4.3(a)上方所示，實際偵測到的影像如圖 4.3(b)所示，並利用 uEye Cockpit 內建功能分析 CCD 所接受到的影像光亮度，影像之亮度分析如圖中虛線所示，從分析圖中可以看到白色線條旁原本應該是黑色暗處的地方仍有亮度，與理論亮度值不同，如圖 4.3(a)下方所示，故由此可知投影畫面中之暗處仍會受到亮光處之影響。

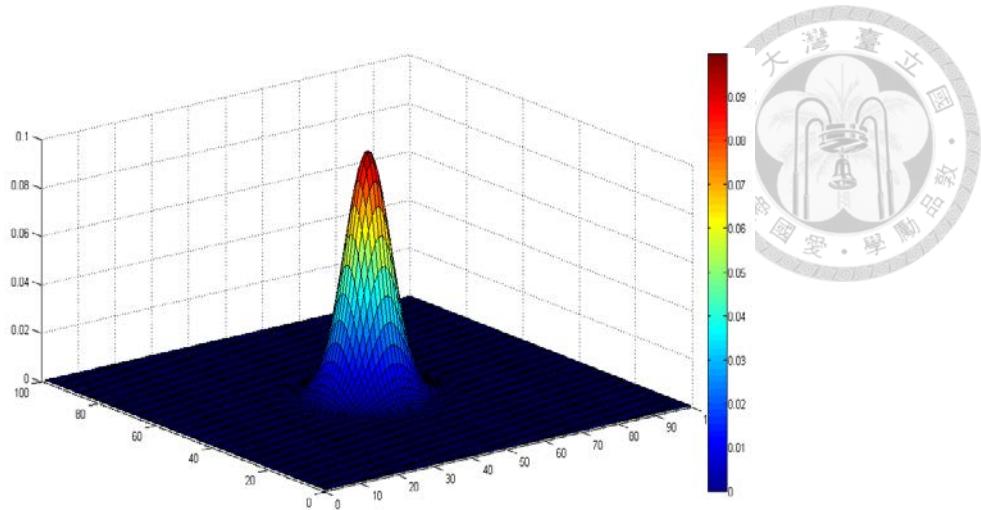


圖 4.2 光點在投影面上形成之高斯分布光場模擬圖

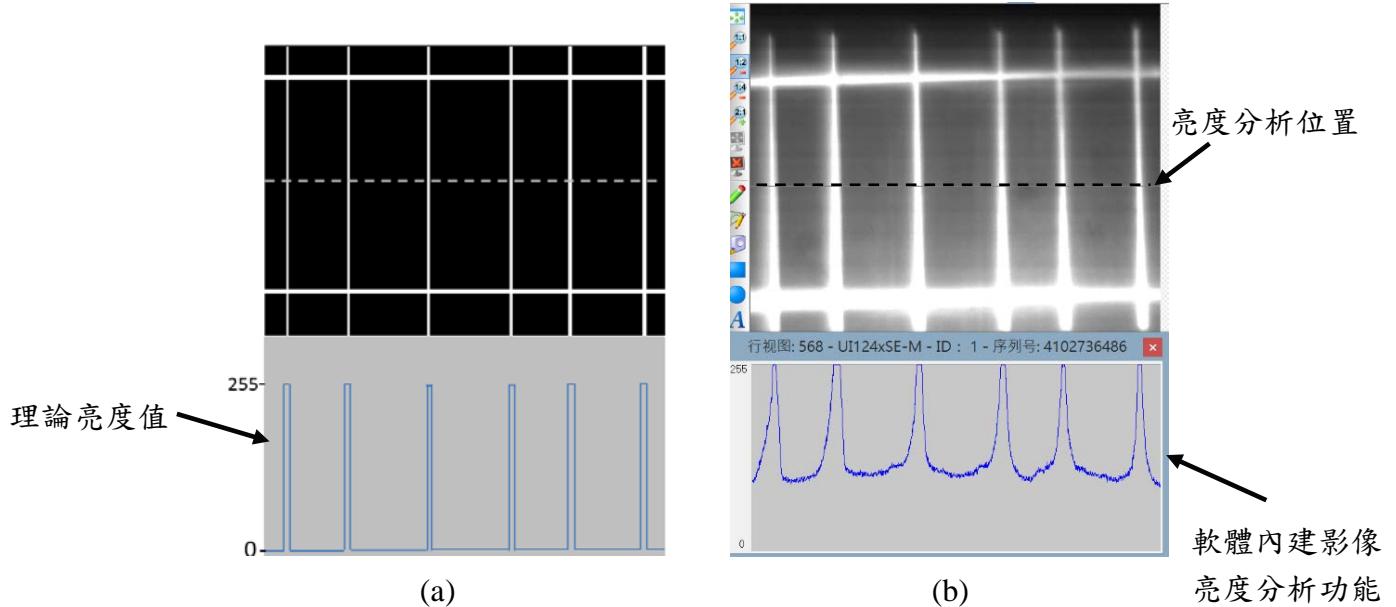


圖 4.3 利用 uEye Cockpit 內建功能分析影像之亮度

4.2.2 Dark cure 現象

分析樹酯對光的成化能力，在此設計成七像素寬之十字模型，從印製的結果發現十字交點之夾角處與設計圖相比有過度成化的現象，如圖 4.4 所示，原本應為黑暗處，不應該有樹酯成化的地方卻因為受到光照反應固化，依據 2.5 小節之文獻所述，此處成化的圓角應為 Dark cure 現象。

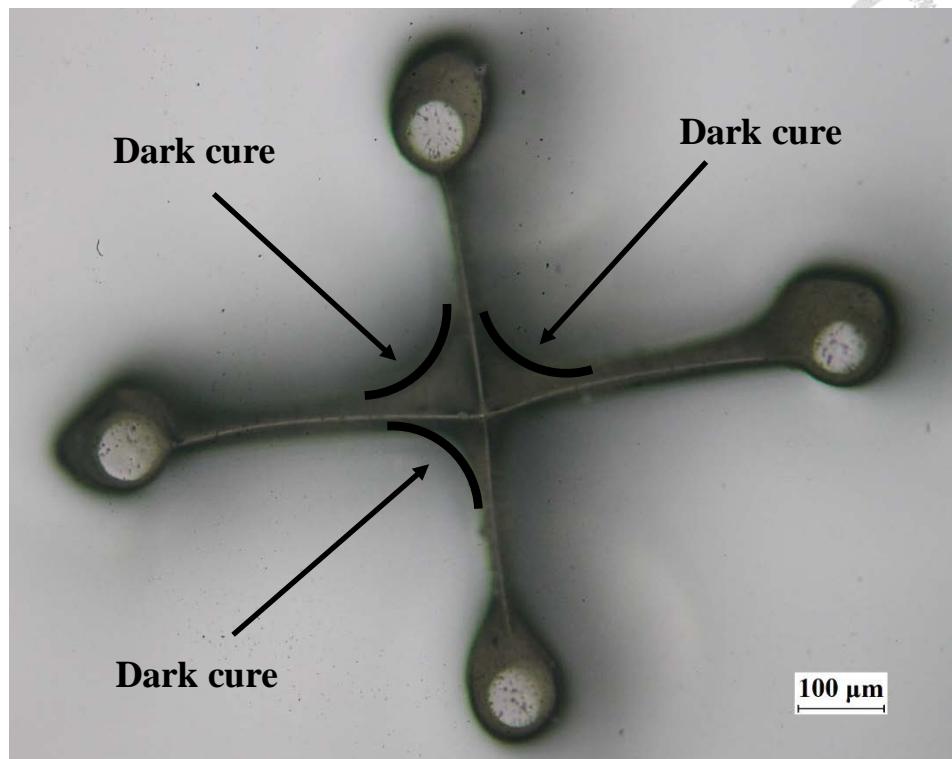


圖 4.4 DB/7 像素寬之十字形模型

為求之後結構印製之完整性設法解決此過度成化現象，在此使用 MATLAB 軟體運算模擬曝光時所造成的光場疊加情形，依據前一小節之光學原理，在此假設每個投影光點會在對焦平面上形成一個高斯分布的光場，每個光點之間的距離相近就會因為高斯光場互相疊加而影響成化結果，當光場強度疊加到一定程度後就會導致樹酯反應成化，產生 Dark cure 的現象。程式設計如圖 4.5 所示，使用 MATLAB 讀取切層圖片，由於在設計模型時使用 Inventor 繪製 3D 立體圖，匯入 Creation Worksho 軟體切層後之切層圖片是 PNG 檔，雖然是黑與白的切層圖片但因為是 RGB 檔，開啟後白色之 RGB 值分別為(R:255、G:255、B:255)、黑色則為(R:0、G:0、B:0)，在 MATLAB 中若要進行之後的運算須將 RGB 的三維矩陣轉換為一維的灰階矩陣，利用 `rgb2gray` 語法轉成灰階圖檔後，黑到白之像素值為 0 到 255，再將圖檔數據轉換成 double 類型，設定高斯分布矩陣之範圍(j)與標準差(k)，可依據實驗印製之成果改變高斯分布之範圍與標準差的大小，最後利用 `conv2` 將灰階圖檔中



每一個數值去乘上高斯矩陣並做累加，以此方法來模擬每一個投影出來的光點所造成的高斯分布光場疊加[29]。

```
I = imread('圖檔路徑');          [匯入圖檔]  
a = rgb2gray(I)                  [將圖檔由 RGB 檔轉成灰階圖檔]  
e=im2double(a)                  [將圖像數據轉成 double 類型]  
j=400;k=25;                     [j 為高斯分布之範圍、k 為標準差  
                                         其中 400、25 為示意值]  
l=fspecial('gaussian',[j j],k)  [設定二維高斯矩陣]  
%surf(1:j,1:j,d) %顯示高斯分布 [觀察高斯分布圖形]  
f=conv2(e,l,'same')             [矩陣疊加]  
[m,n]=size(a);                 [設定疊加結果之圖檔尺寸]  
surf(1:n,1:m,f)                [顯示疊加結果]
```

圖 4.5 使用 MATLAB 模擬投影光高斯分布之疊加情形

利用此套程式模擬未經修改灰階亮度之十字圖形，嘗試成功方式改變不同之高斯分布之範圍(j)與標準差(k)使模擬出來的光場強度圖與實驗結果相近，如圖 4.6、圖 4.7 所示，從圖中可以看到在十字形交界處紅色部分為能量較強處，夾角處有圓角與實驗結果相似，故此高斯分布所設定的範圍值($j=50$)與標準差值($k=5$)具有參考的價值，可用來做後續調整圖形亮度參數之模擬與分析。由圖 4.7 之光場強度模擬圖可以看到，黃色部分與實際成化之範圍相似，對應到右側數值圖例，黃色值約在 8 左右，故可推測經過程式運算後，光場強度值要超過 8 以上才會使樹酯反應成化。

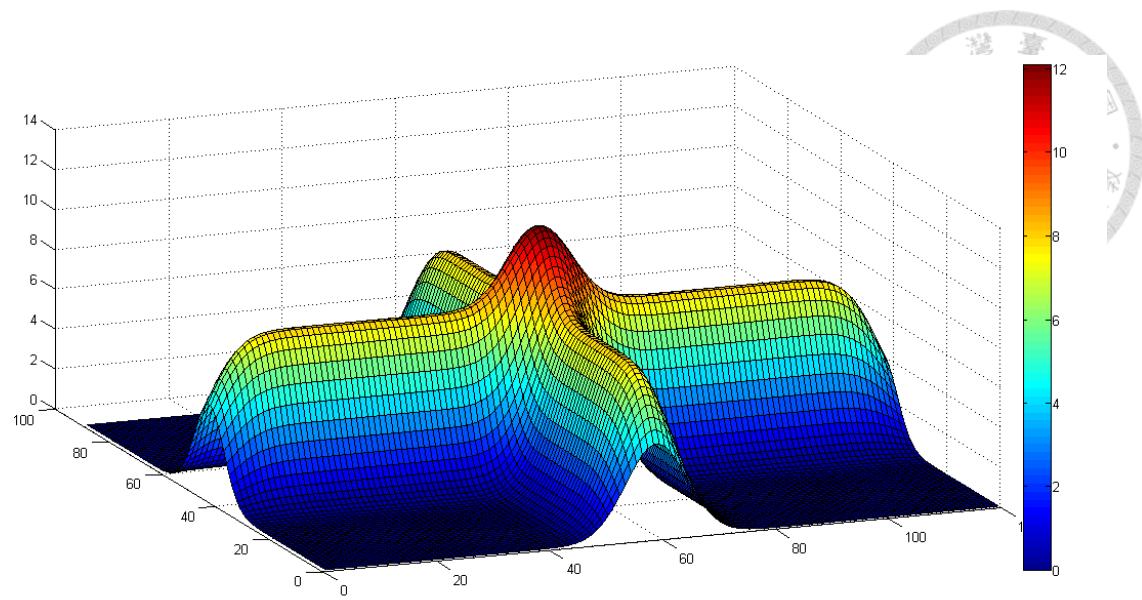


圖 4.6 十字形圖案使用 MATLAB 程式運算後之光場強度模擬立體圖

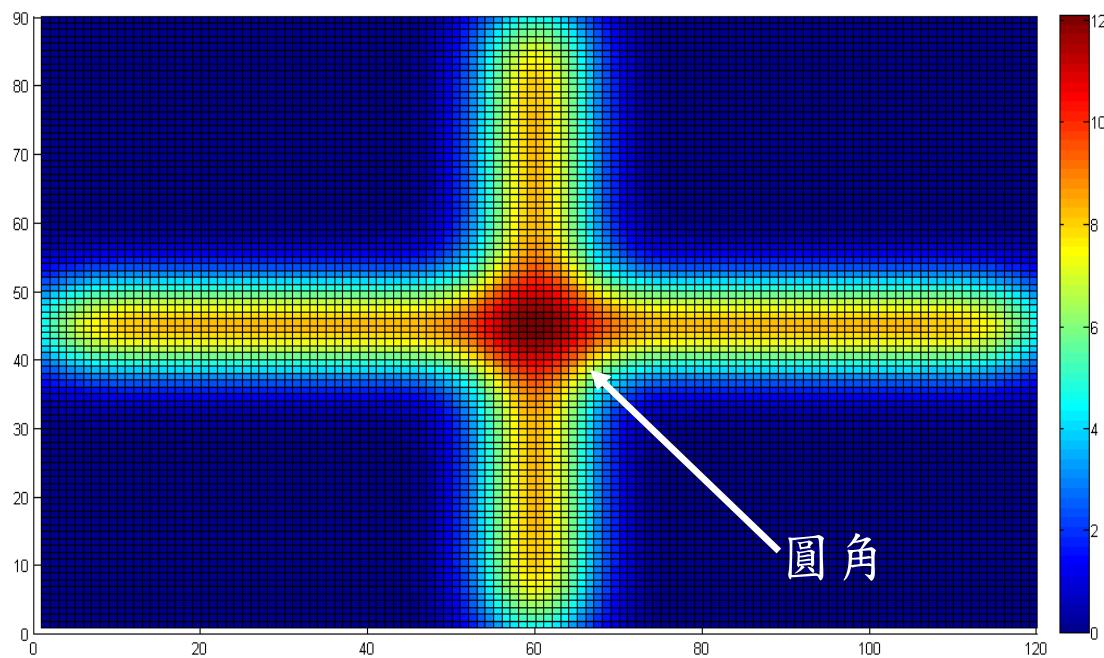
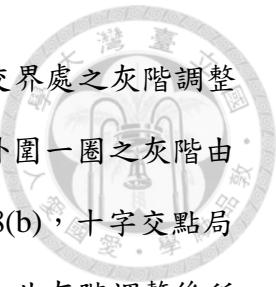


圖 4.7 十字形圖案使用 MATLAB 程式運算後之光場強度模擬 2D 圖



調整十字交界處之灰階值，並使用此程式反覆測試模擬，將交界處之灰階調整如圖 4.8(a)所示，中心 5×5 之灰階值由 255 降低至 100，中心外圍一圈之灰階由 255 降低至 200，由 MATLAB 程式模擬光場強度立體圖如圖 4.8(b)，十字交點局部放大圖如圖 4.8(c) 所示，還是可以看到夾角處有一點圓角。由此灰階調整後所印製之結構如圖 4.8(d)所示，交界處之 Dark cure 現象沒有明顯改善。

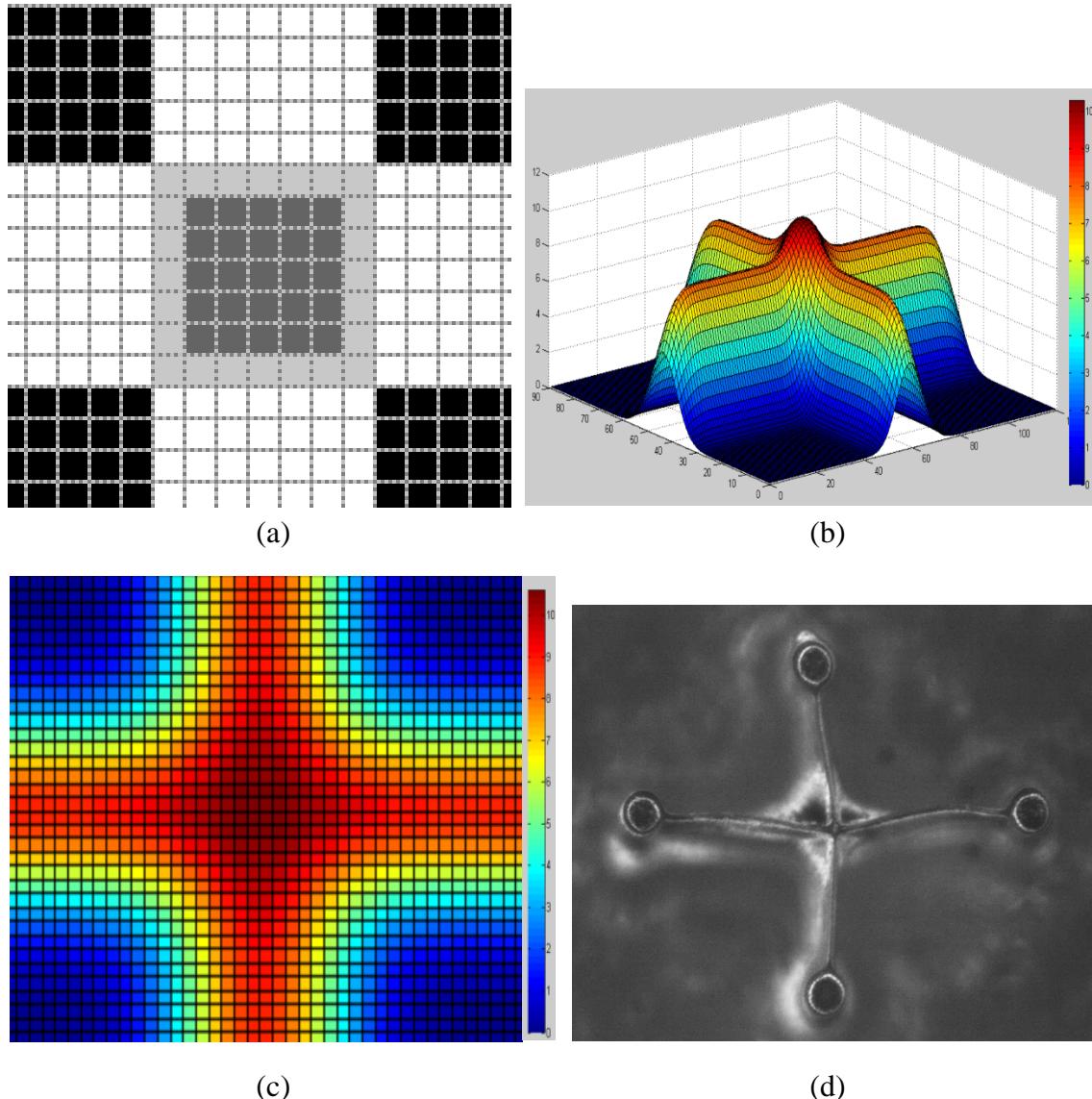


圖 4.8 (a)灰階調整中間 5×5 灰階值降低至 100、周圍降低至 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果



根據圖 4.8(d)的結果可以知道，夾角處之灰階值降的不夠低，以至於 Dark cure 現象沒有明顯改善，故將交界處之灰階值再做調整，如圖 4.9(a)所示，中心灰階值維持 100，四個角落之灰階值為 180，角落延伸之邊長灰階值為 200。圖形經 MATLAB 運算模擬後如圖 4.9(b)、(c)所示，十字交界處之光場強度稍低於平均值，實際印製後如圖 4.9(d)所示。

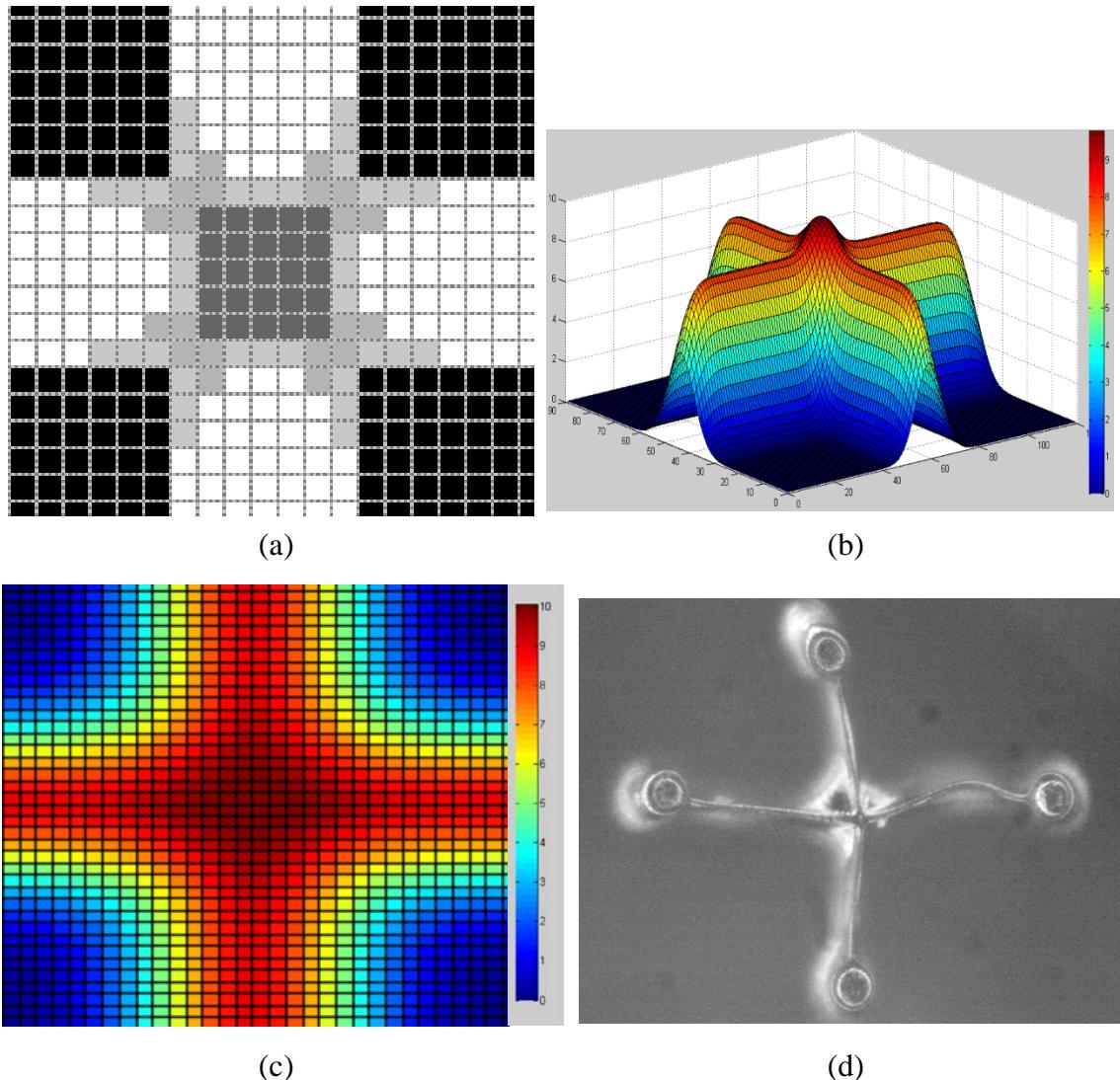


圖 4.9 (a)調整中間 5×5 之灰階值降低至 100、四個角落降低至 180、角落延伸之邊長為 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果



延續使用圖 4.8(a)之灰階參數，並將中心 3×3 之像素灰階值降低至 0，如圖 4.10(a)所示，使用 MATLAB 程式模擬後如圖 4.10(b)、(c)所示。從結果圖 4.10(d)可以看到此灰階參數所印製之夾角處已略為改善 Dark cure 現象，但仍然無法完全消除已成化之圓角。

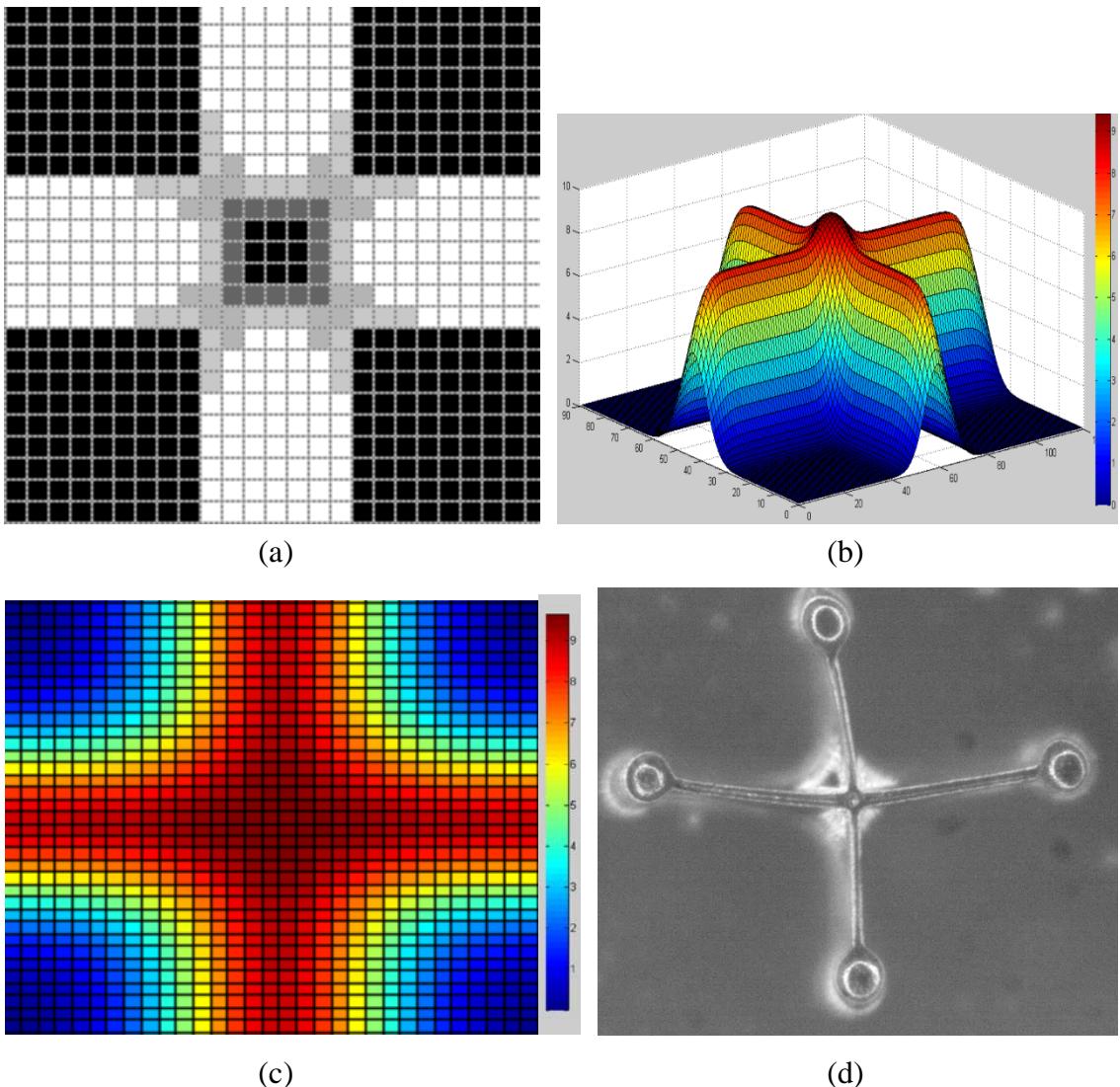


圖 4.10 (a)調整中間 3×3 之灰階值降低至 0、外面一層灰階值 100、四個角落降低至 180、角落延伸之邊長為 200(b)MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度側視圖(c) MATLAB 模擬高斯分布疊加後之光場強度上視圖(d)使用調整過灰階的圖形印製之結果



比較光場強度模擬圖，先前與實際印製成果比較後分析強度之數值要大於 8 才會使樹酯反應成化。未經灰階亮度調整之模擬圖，如圖 4.11(a)所示，修改灰階後之模擬圖如圖 4.11(b)所示，光場強度足以成化之圓角範圍如圖中箭頭所示，經過灰階亮度處理之模擬圖較未修改過的來的小。

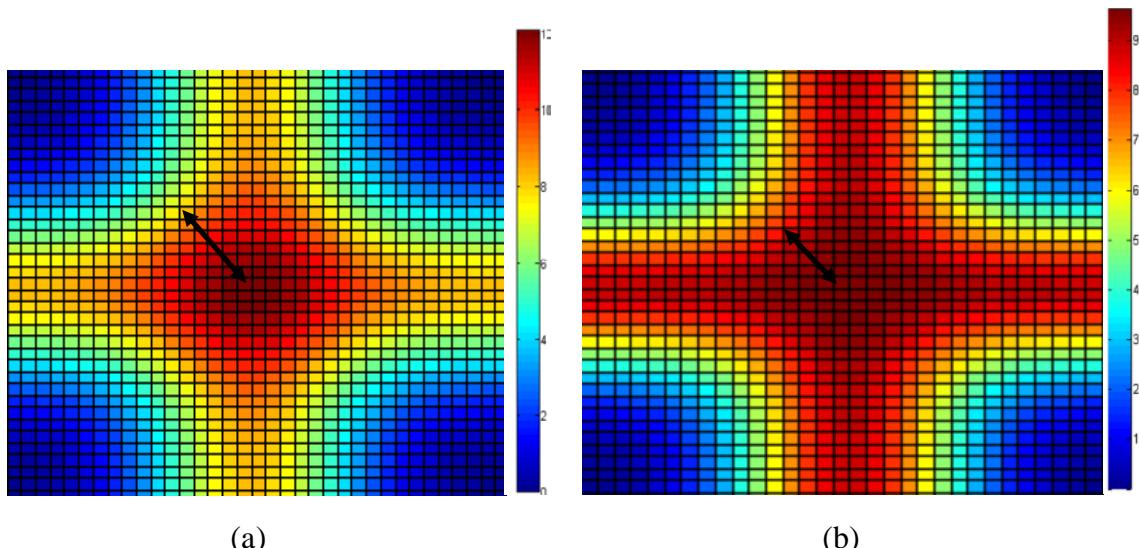


圖 4.11 光場強度模擬圖(a)灰階亮度未經修改(b)灰階亮度修改後

比較灰階值修改前後對實際印製之 Dark cure 影響，如圖 4.12 所示，(a)為未經修改之實際印製情形、(b)為經過灰階亮度修改後實際印製情形，從圖中比較後可以看到(b)之夾角處成化相較於(a)範圍較小。

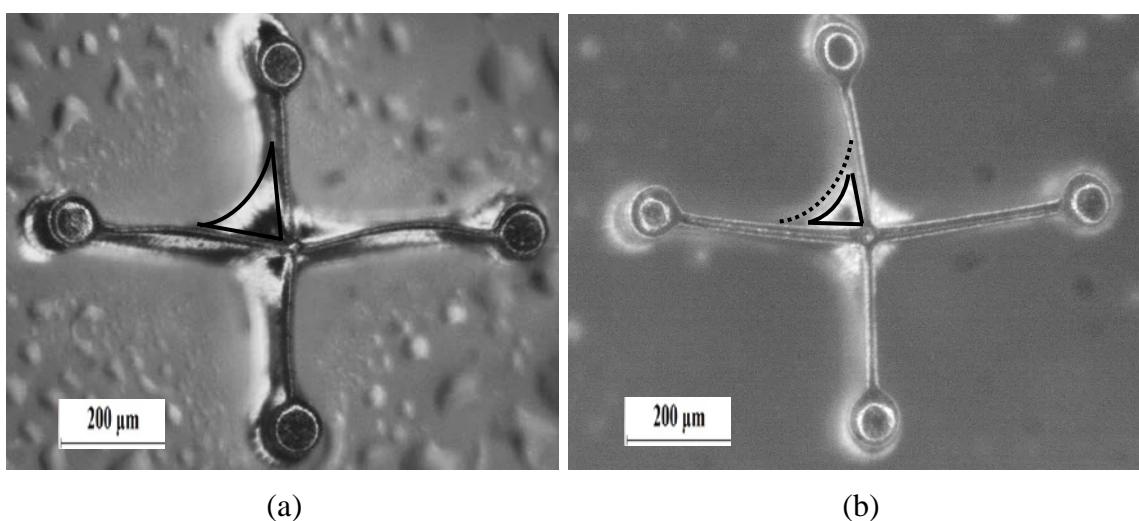


圖 4.12 灰階值修改前後比較圖



4.2.3 角度分析

分析角度的變化對夾角處 Dark cure 的影響，在此設計成十字型，線寬設定為 4 像素寬，角度從 90° 到 150° ，因補角可同時得到 80° 到 30° 的角度變化。利用 MATLAB 軟體進行模擬分析，針對切層圖片中紅色區塊內的圖形進行模擬，如圖 4.13 所示，程式運算後得到之高斯光場強度累加模擬圖，如圖 4.14 左側所示，右側為不同角度之實際印製情形，當角度增加至 100° 、 110° 時，光場高斯分布的疊加減少，邊緣處成化現象有較為減少，而補角處 80° 、 70° 因為夾角變小，因為光場高斯分布疊加產生過度成化的效果明顯增加；當角度增加至 120° 以上時，夾角處已無過度成化產生的圓角現象，故在不調整樹酯配方的情況下，採用 120° 以上之夾角設計結構圖形較為適合。

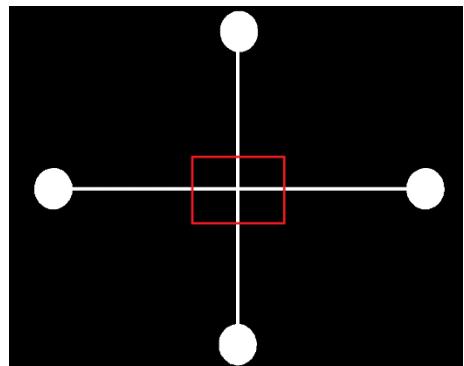
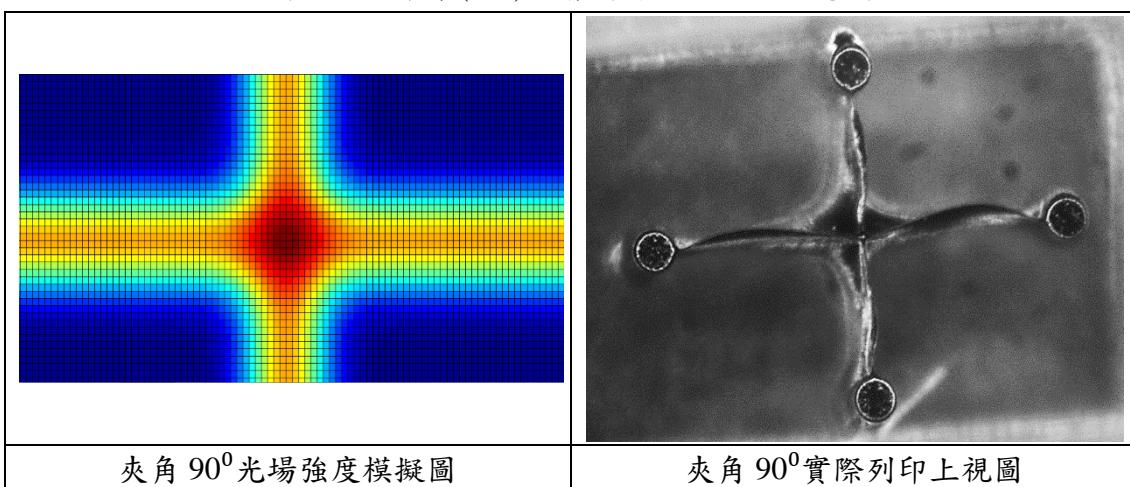
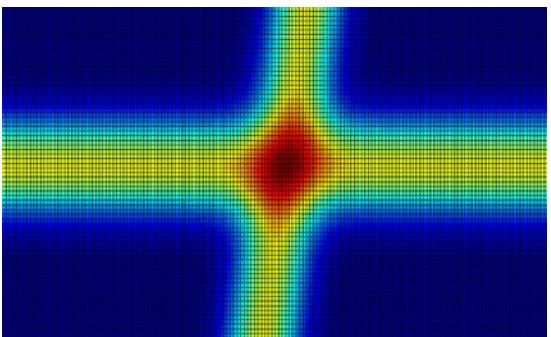
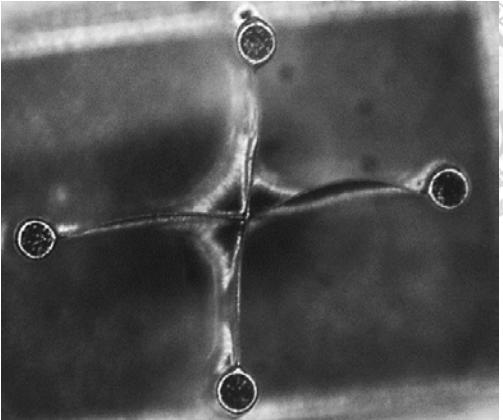
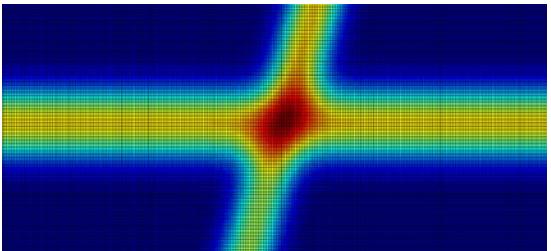
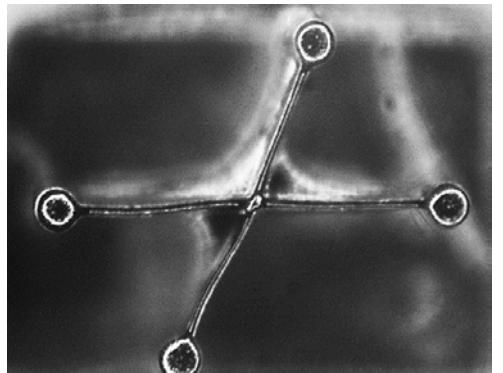
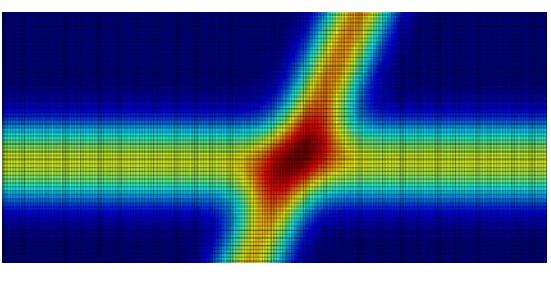
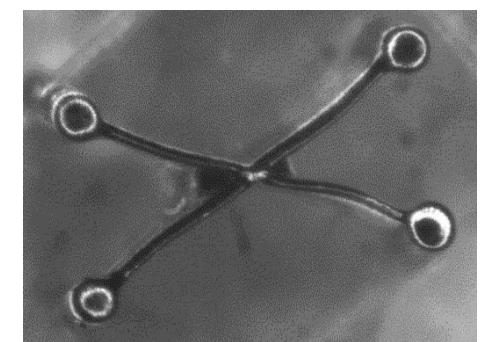
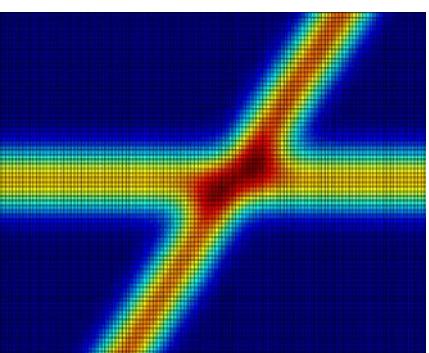
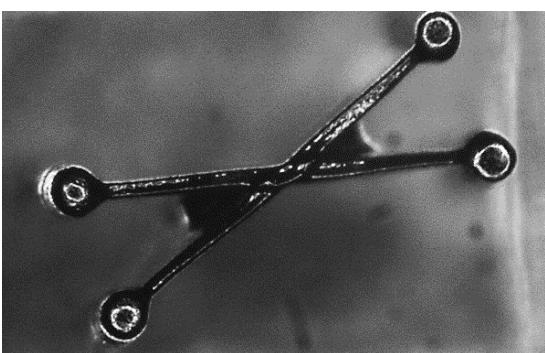


圖 4.13 十字(90°)切層圖片模擬區域示意圖



	
夾角 $100^\circ/80^\circ$ 光場強度模擬圖	夾角 $100^\circ/80^\circ$ 實際列印上視圖
	
夾角 $110^\circ/70^\circ$ 光場強度模擬圖	夾角 $110^\circ/70^\circ$ 實際列印上視圖
	
夾角 $120^\circ/60^\circ$ 光場強度模擬圖	夾角 $120^\circ/60^\circ$ 實際列印上視圖
	
夾角 $130^\circ/50^\circ$ 光場強度模擬圖	夾角 $130^\circ/50^\circ$ 實際列印上視圖

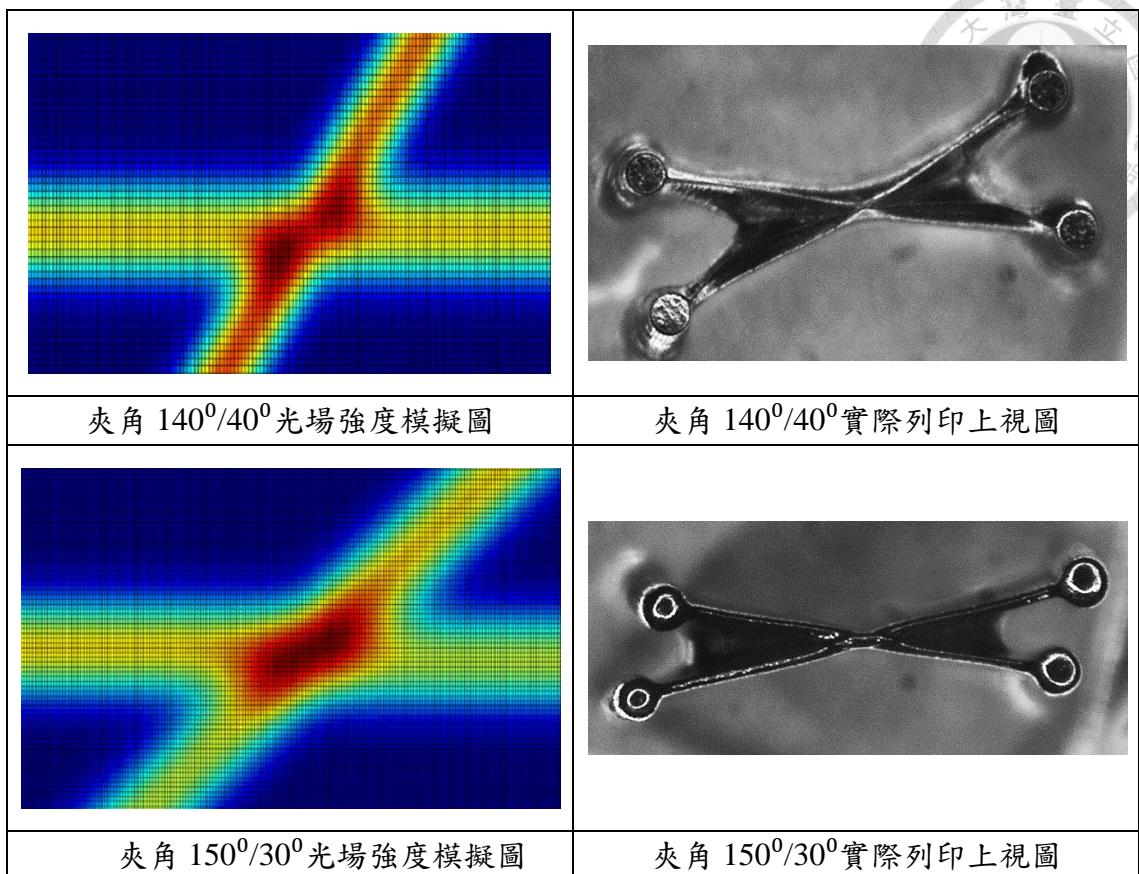


圖 4.14 不同角度在光場高斯分布累加下的影響

4.2.4 小結

利用 MATLAB 軟體撰寫程式進行數值運算，可以模擬出因為高斯光場疊加而產生的 Dark cure 現象，但實際的印製情形與模擬狀況不盡相同，可能是因為參數設定的不夠完全，或是在實際印製時還有其他更複雜的成化現象，從角度分析中可以看到，當角度縮得越小，其夾角處下層過度成化的現象越明顯，與模擬出來之結果相差甚遠，推測是因為深度方向光的穿透並且疊加而導致能量足以成化，故無法單以高斯光場平面疊加的效應就能模擬實際印製的情形。但此程式所進行的運算模擬還是有可參考的價值，在做灰階亮度調整時，可從模擬測試的結果中看到光場強度的變化，故可藉由重複調整灰階值經模擬後再去進行實際印製的工作，雖然結果未必會與模擬完全相同，但可以省去不少時間跟材料成本。



第五章 實驗結果

5.1 結構設計與命名

從 4.2.3 角度分析的結果得知，當角度達到 120° 以上時夾角處因光場高斯分布疊加產生的圓角效應較小，因此選用 120° 作為結構夾角設計之角度，在此設計成六角型蜂窩狀結構模型，如圖 5.1(a)所示，邊與邊之間夾角皆為 120° 。實驗中印製並測試了不同尺寸之結構，為便於分析比較結構之設定大小，因此以結構之長-寬-高命名之。

命名格式定為 L-W-H，L 為六角型單層結構之邊長；W 為六角型之線寬；H 為單層六角結構之高度，如圖 5.1(b)所示，單位為微米。並將結構設計交錯堆疊而成，第一層的六角型空孔與第二層的邊長交集處重合，並以重覆堆疊的型式構成結構。判定結構是否通透的方式為，從前一層的空孔中可以看到下一層的結構輪廓，且空孔中無樹酯殘留，如圖 5.2 所示。

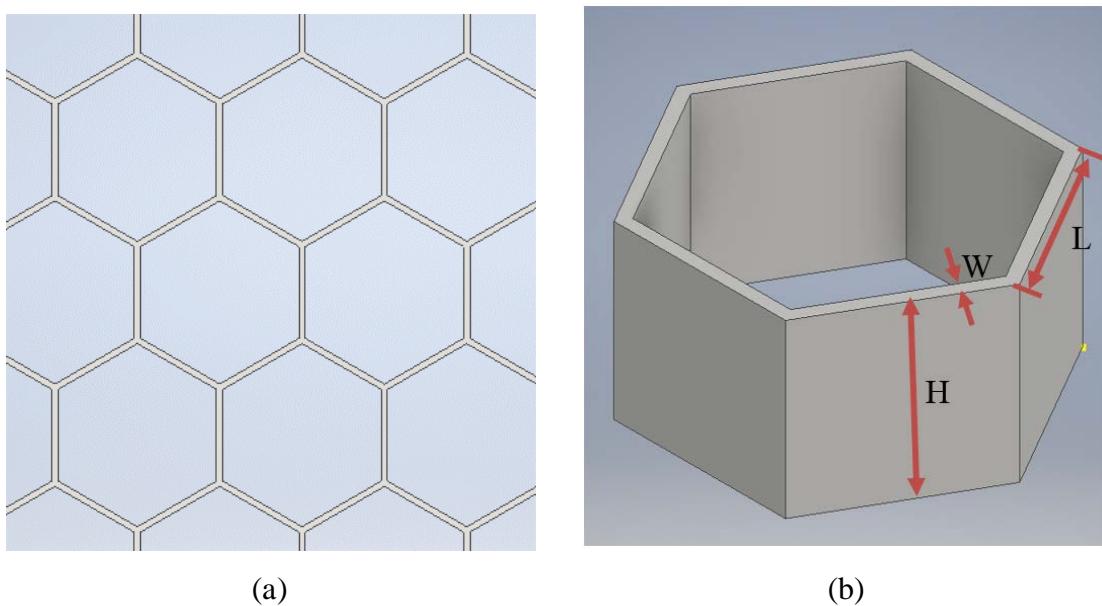


圖 5.1 (a)六角型蜂窩狀結構圖形 (b) 結構命名示意圖

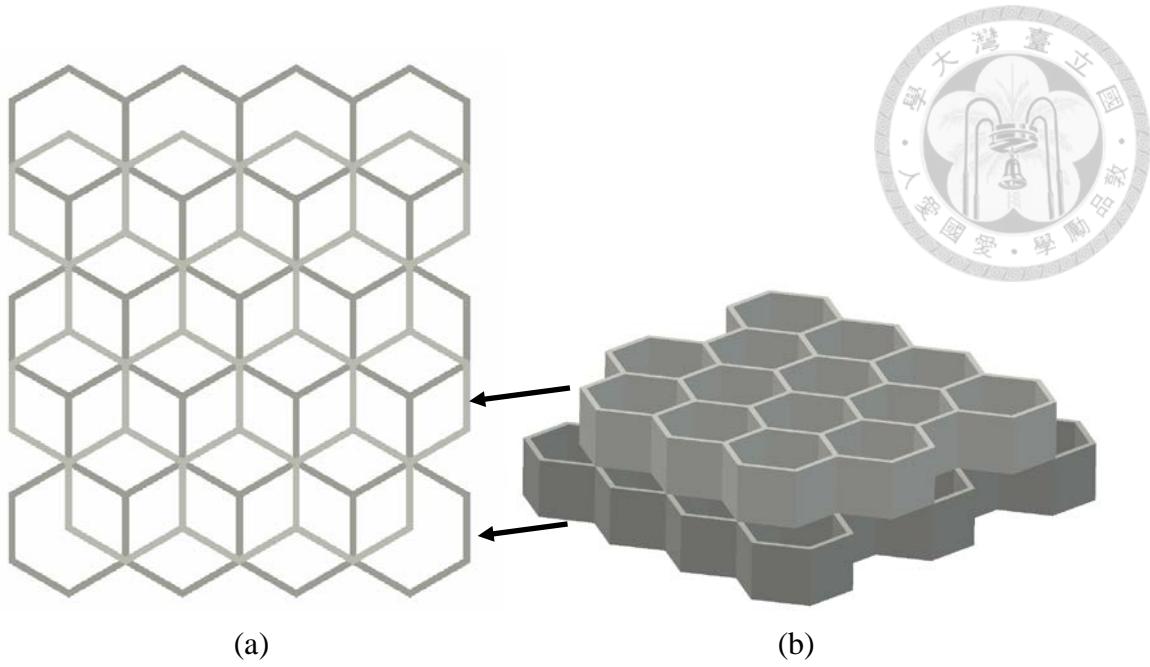


圖 5.2 (a)結構堆疊示意上視圖 (b)結構堆疊示意側視圖

實驗中發現，本系統之最小理論解析度原本如 3.1.3.4 小節所述為 $0.757(\mu\text{m}/\text{pixel})$ ，但由於本實驗使用筆電之螢幕最高解析度只到 1366×768 ，重新計算實際能印製之最小理論解析度為 $1.064(\mu\text{m}/\text{pixel})$ ，使用 Inventor 繪製好的結構立體圖轉成 stl. 檔後，將其匯入 Creation Workshop，使用軟體切層後把切層圖片使用 PNG 檔開啟並確認其圖片之實際像素值。從圖中發現六角形之設計尺寸長邊為 $150\mu\text{m}$ 、線寬為 $15\mu\text{m}$ 之結構，其切層圖片中六角形長邊為 130 像素、線寬為 15 像素寬，乘上實際理論解析度 $1.064(\mu\text{m}/\text{pixel})$ 後，實際印製後之理論長度應為 $138.32\mu\text{m}$ 、理論線寬應為 $15.96\mu\text{m}$ ，與設計尺寸略有差異，邊長會縮小至設計尺寸之 86%。以下在做通透測試時以設計之尺寸來作敘述，實際印製後所量測之尺寸則以理論尺寸來做討論。

5.2 結構通透測試

設定測試結構之尺寸由大到小循序進行實驗，並依據列印之成果調整樹酯配方以及曝光時間、切層厚度等等參數，反覆測試後即可得到最佳列印參數。列印完



成後先觀察其頂部之結構是否清晰且符合預期，若頂部之結構通透可見下一層之六角形輪廓，再利用此參數把結構之列印高度增加並將其折斷，觀察結構斷面的完整性以及成化情形來判定結構是否通透，並嘗試使用不同的清洗方式來去除結構內殘留的樹酯。以下依據不同結構之設計尺寸比較說明測試結果。

5.2.1 結構 150-21-100

結構-150 之六角型設計邊長 $150\mu\text{m}$ 、線寬 $21\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $100\mu\text{m}$ ，初步測試時先設計成較為簡單的堆疊形狀以方便觀察結構內部是否通透，第一層與奇數層為單一六角型，第二層與偶數層為三個六角型，如圖 5.3(b)所示。圖 5.3(a)為樹酯 DB0、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 200 毫秒列印之結構，從上視圖可以看到前兩層之結構輪廓清晰，但從圖 5.3(c)側視圖可以看到第三層外圍已被第二層所列印之結構影響，導致深度方向過度成化並產生 2.5 小節所述之 Cure depth 現象，因此在 DB 中加入蘇丹用來吸收過多的紫外光以減少過度成化。

圖 5.4 為使用 DB1 印製結構-150 之上視圖與側視圖，切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間因為 DB 加入蘇丹而提高到 300 毫秒才能成功印出較好之結構，可以從圖 5.4(b)側視圖看到深度方向過度成化的影響已略有減少，但還是有大約每層高度 50% 的過度成化。

提高蘇丹含量至 0.15g ，使用 DB2 印製，並將結構重新設計，頂部開始奇數層由三個六角型組成，偶數層由七個六角形組成，如圖 5.6(b)所示。切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間提高到 410 毫秒，從圖 5.6(c)側視圖可以看到提高蘇丹含量已解決大部分深度方向之過度成化，但還是有部分 Cure depth 存在。

繼續提高蘇丹比例，使用 DB3、DB4、DB5 來印製結構，圖 5.7(a)為使用 DB3、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 430 毫秒；圖 5.7(b)為使用 DB4、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 420 毫秒；圖 5.8 為使用 DB5、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 400 毫秒之上視圖

與側視圖。隨著蘇丹比例的增加，Cure depth 改善的效果有稍微變好，從 DB 的穿透成化厚度 $100\mu\text{m}$ 縮小至約 $20\mu\text{m}$ ，但仍無法完全消除此現象。

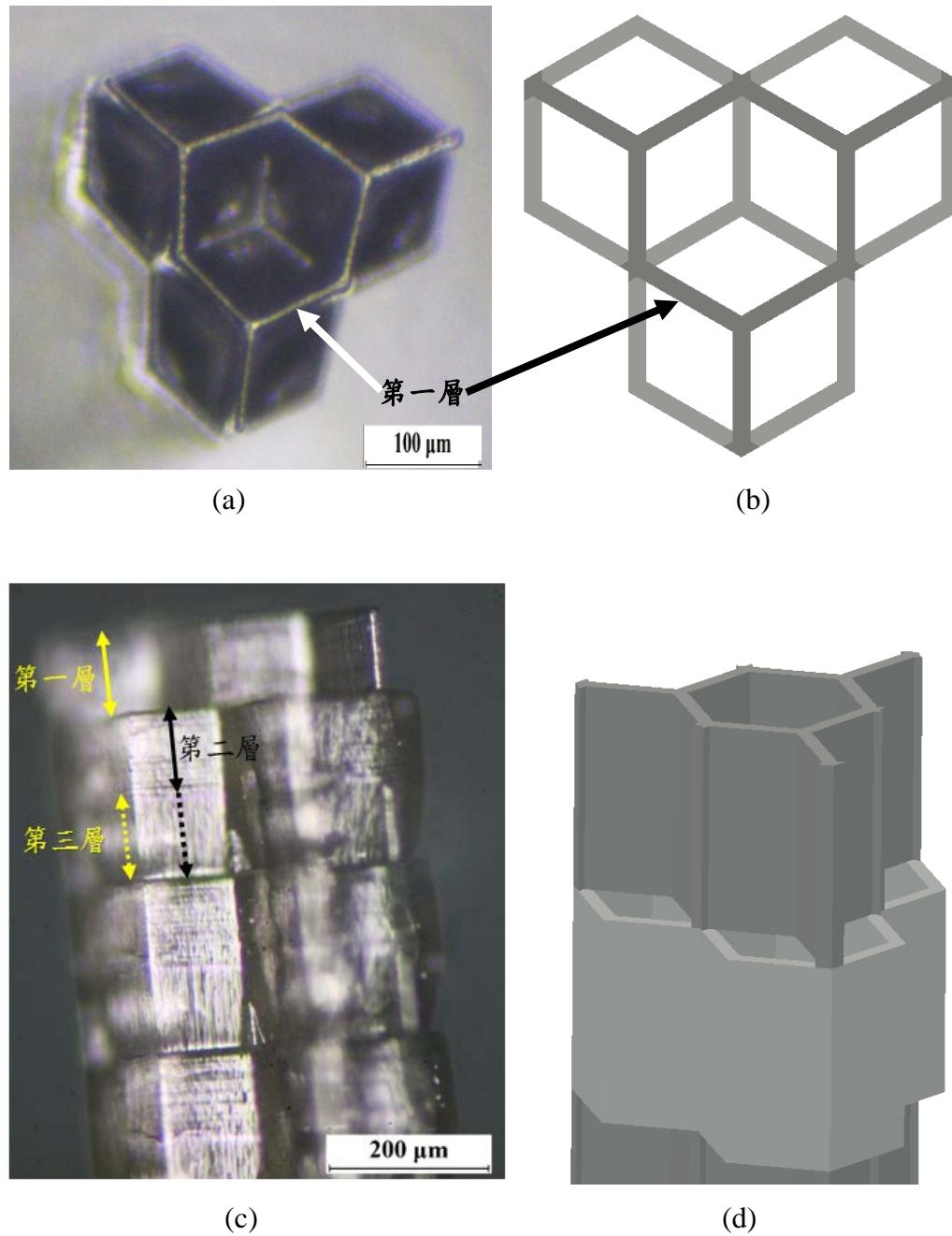


圖 5.3 結構-150 樹酯 DB0(a)實際印製上視圖 (b)結構設計上視圖 (c)實際印製側視圖(d)結構設計側視圖

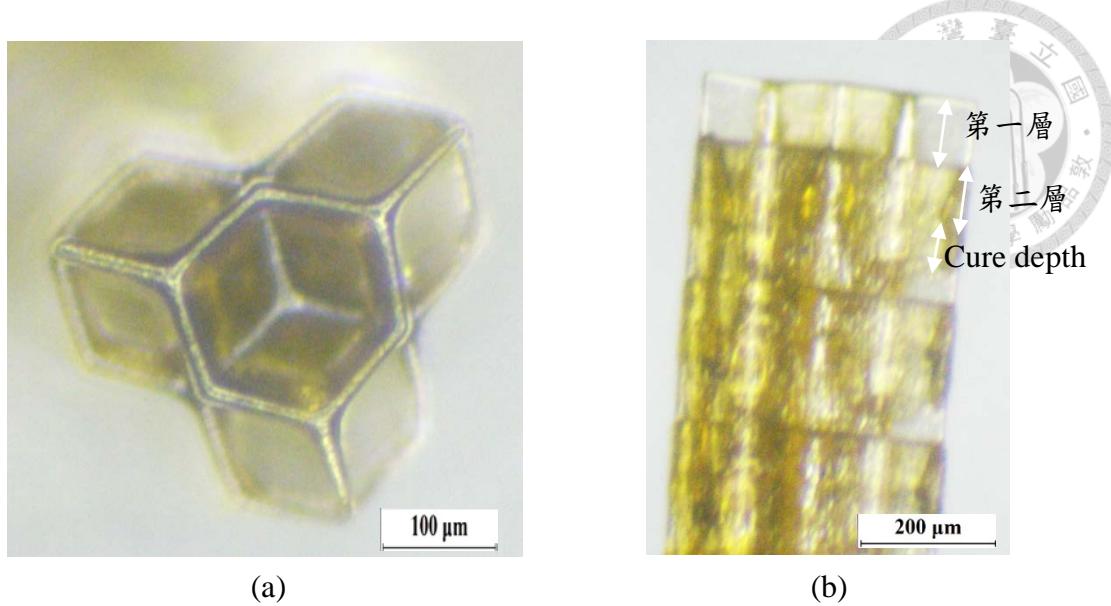


圖 5.4 結構-150 樹酯 DB1 實際印製 (a)上視圖 (b)側視圖

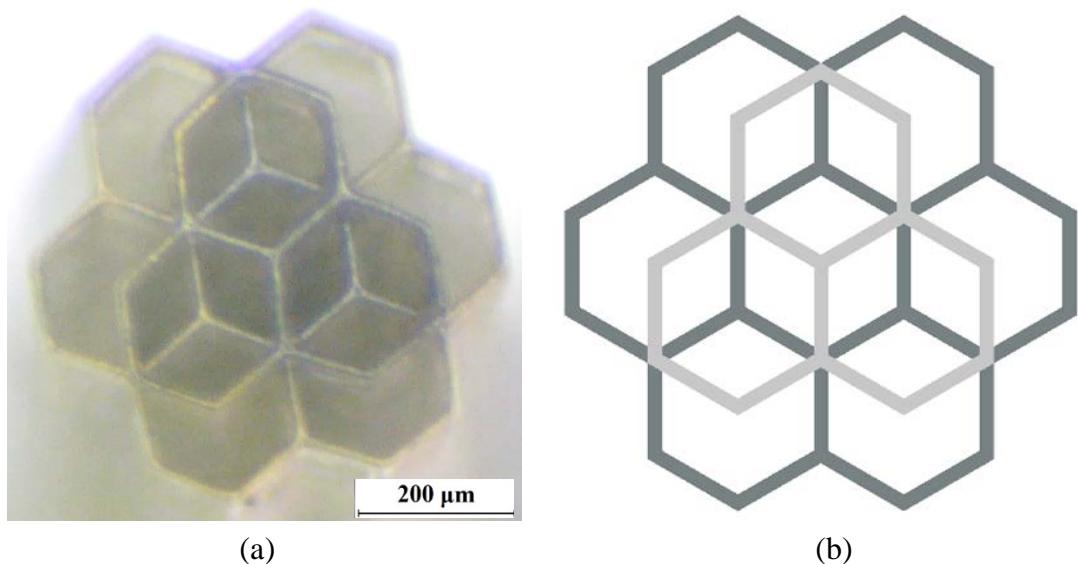


圖 5.5 結構-150 樹酯 DB2(a)實際印製(b)結構設計 上視圖

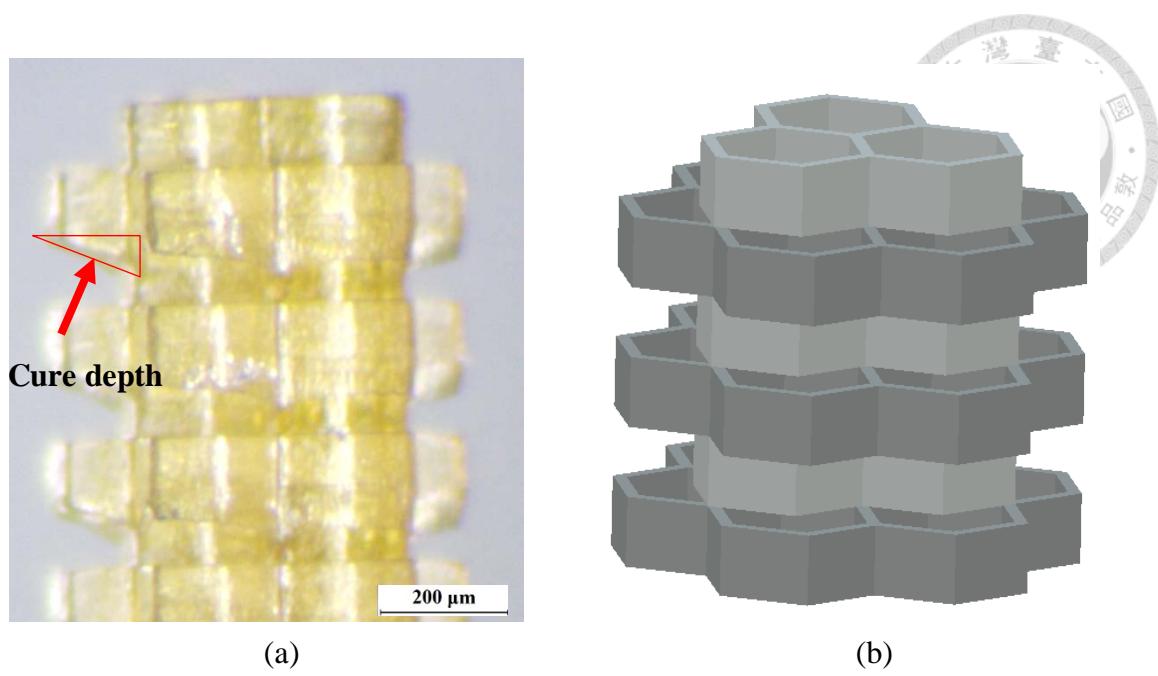


圖 5.6 結構-150 樹酯 DB2(a)實際印製(b)結構設計側視圖

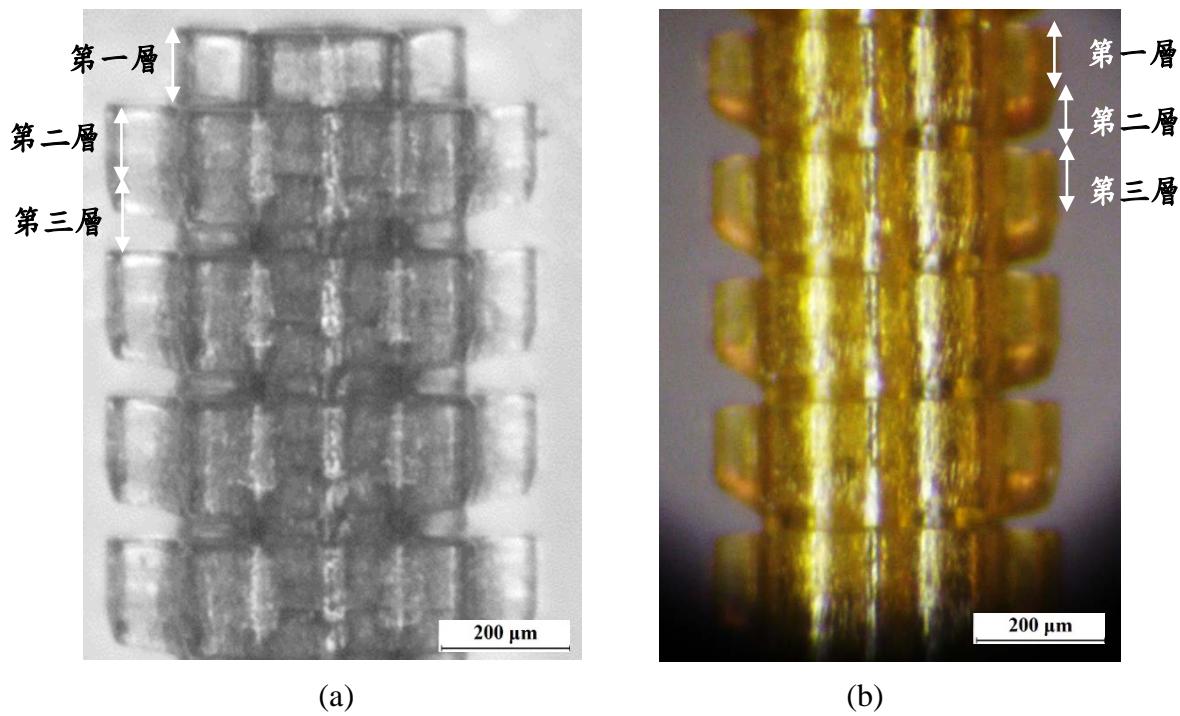


圖 5.7 結構-150 實際印製(a)樹酯 DB3(b)樹酯 DB4 側視圖

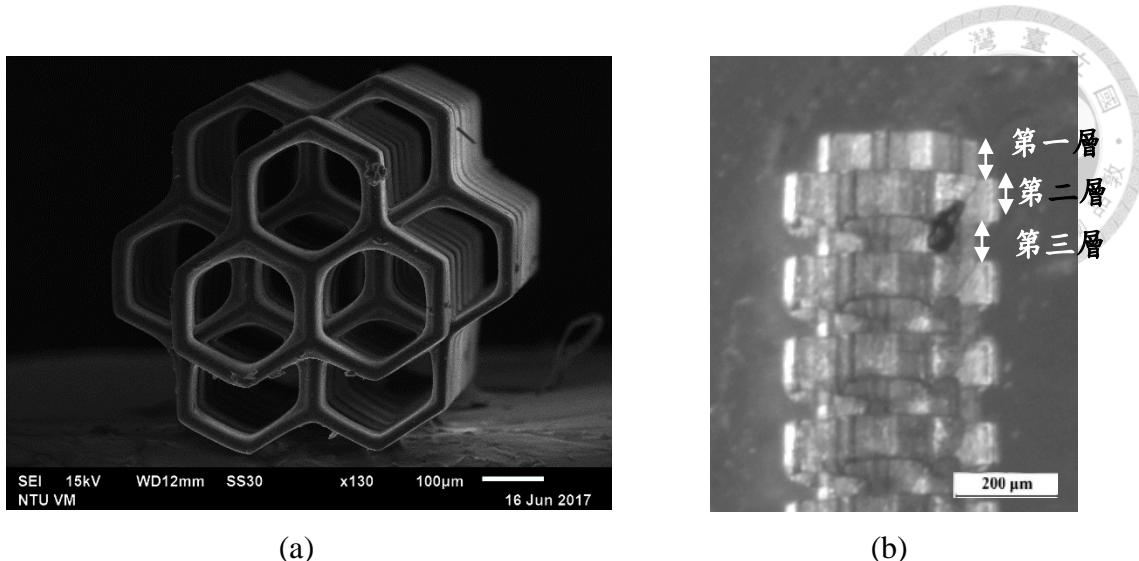


圖 5.8 結構-150 樹酯 DB5、曝光時間 400 毫秒(a)SEM 拍攝之結構頂部(b)光學顯微鏡拍攝之結構側視圖

為確保結構整體是通透且形狀一致的，在此將結構列印高度增加以方便將其折斷，並觀察其斷面是否完整，若斷面通透完整才能將此列印參數作為後續印製試片時之參考參數。圖 5.9(a)為使用 DB5、切層厚度 4 μm 、印製高度 4mm、每層曝光時間 400 毫秒之結構頂部圖，圖 5.9(b)為結構折斷後之折斷面圖，從斷面圖中可以看到結構之輪廓與頂部相似，折斷處因為受到力量彎折而有變粗的情形發生，就整體而言可以斷定此列印參數下所印製的結構是通透的。

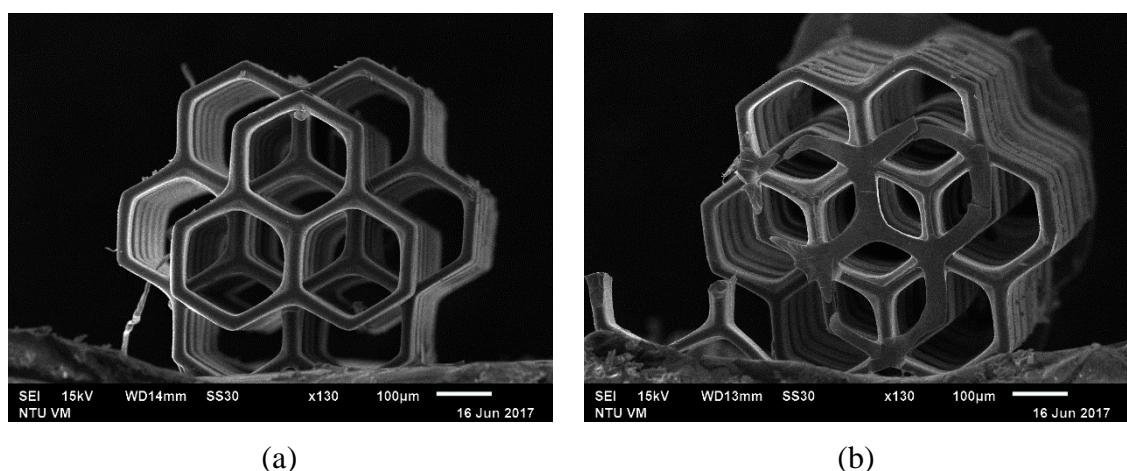


圖 5.9 結構-150 樹酯 DB5、曝光時間 400 毫秒列印(a)SEM 拍攝之結構頂部
(b)SEM 拍攝之結構折斷面



5.2.2 結構 120-7-100

縮小六角型結構設計尺寸，邊長 $120\mu\text{m}$ 、線寬 $7\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $100\mu\text{m}$ ，頂部開始奇數層由六個六角型組成，偶數層由 12 個六角型組成，如圖 5. 10(b)結構設計上視圖與(d)結構設計側視圖。首先使用 DB 印製、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 200 毫秒，結果如圖 5. 10(a)實際印製之上視圖與(c)實際印製之側視圖。從結果中得知，與結構-150 相比，線寬由 $21\mu\text{m}$ 縮小至 $7\mu\text{m}$ ，深度方面因為穿透導致過度成化的問題依然存在。

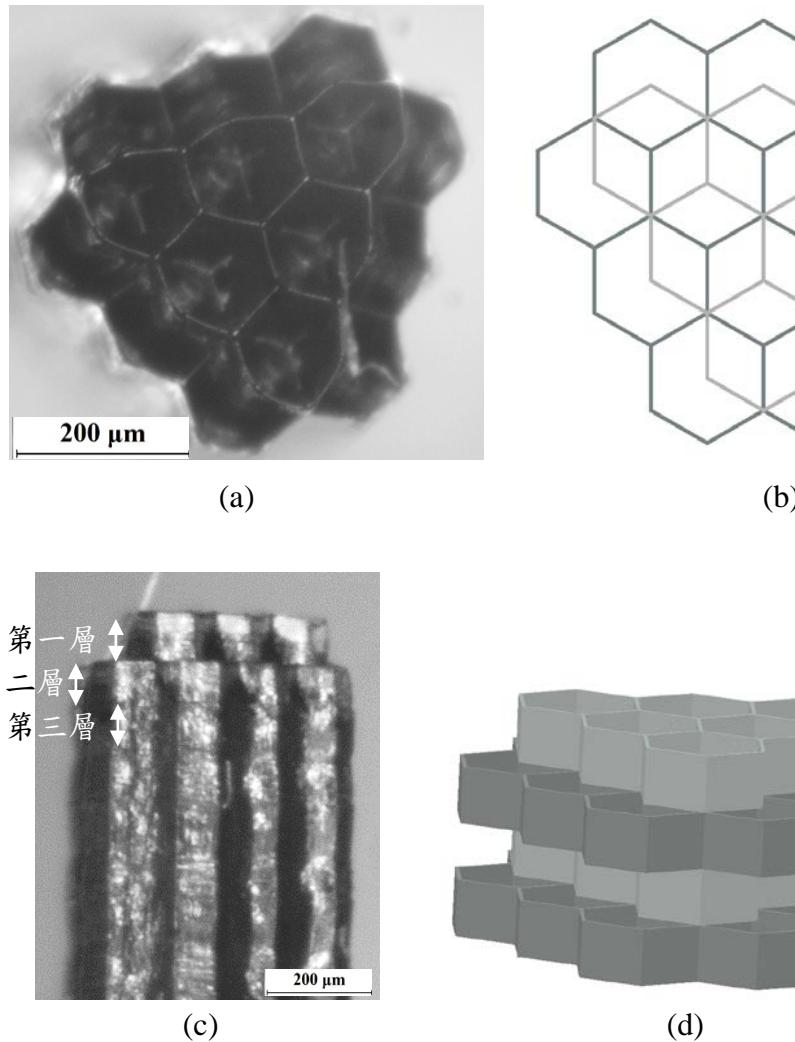


圖 5. 10 結構-120 樹酯 DB (a)實際印製上視圖(b)結構設計上視圖(c)結構印製側視圖(d)結構設計側視圖



從結構-150 之列印結果得到，DB5 對於改善深度方向之 Cure depth 現象效果最佳，因此直接嘗試使用 DB5 印製，又因為此配方之蘇丹含量高，設計線寬從 $21\mu\text{m}$ 縮小至 $7\mu\text{m}$ ，切層厚度 $4\mu\text{m}$ 不變的情況下，測試多組後將曝光時間提高到 800 毫秒才能印出完整結構，如圖 5.11(a)所示，首層結構完整通透可從六角型空孔中看到下一層之結構輪廓；結構折斷後之折斷面圖，如圖 5.11(b)所示，斷面清楚可看到兩層結構之輪廓，折斷處因受力破壞也有變粗的現象；結構側視圖，如圖 5.11(c)所示，就整體通透性而言此配方及樹酯是較佳之列印參數。

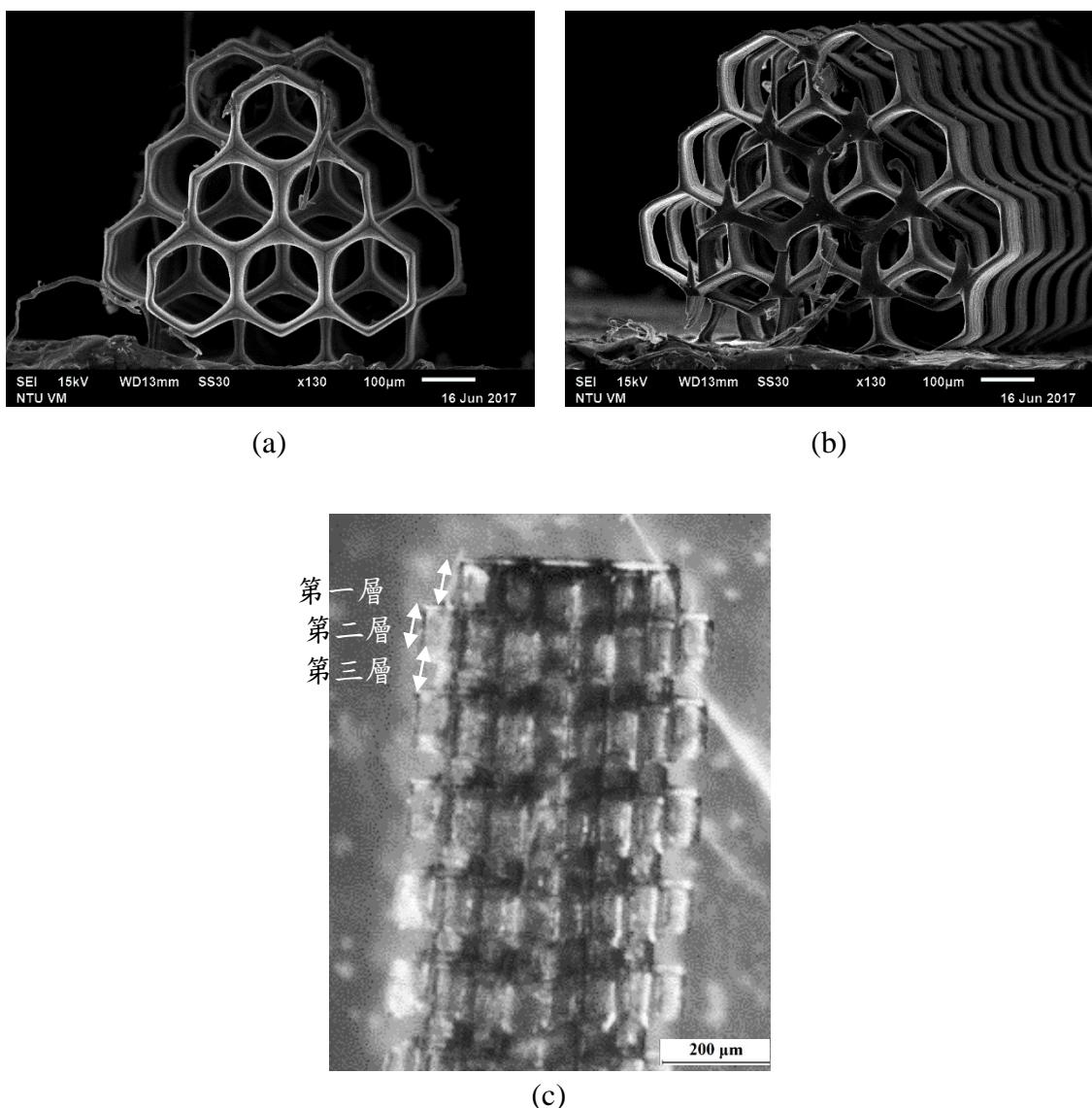


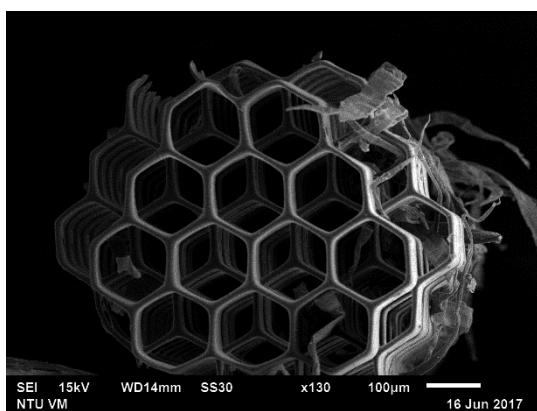
圖 5.11 結構-120 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構(a)SEM 拍攝之結構頂部(b)SEM 拍攝之結構折斷面(c)光學顯微鏡拍攝之側視圖



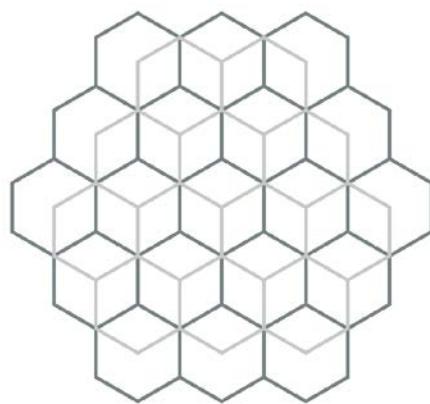
5.2.3 結構 100-7-100

設計尺寸之邊長縮小至 $100\mu\text{m}$ 、線寬 $7\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $100\mu\text{m}$ ，實驗結果如圖 5.12 所示，使用 DB5 印製、切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 600 毫秒。從圖 5.12(a)上視圖可以看到結構輪廓清楚且通透，由圖 5.12(c)實際印製之側視圖可以看到深度方向大致上已無過度成化的現象，圖 5.12(e)為結構折斷後之斷面情形，從圖中可以看到斷面與下層的結構形狀清楚且無殘留樹酯或過度成化。相同切層厚度下，曝光時間 800 毫秒整理於附錄中之附圖 1、附圖 2。

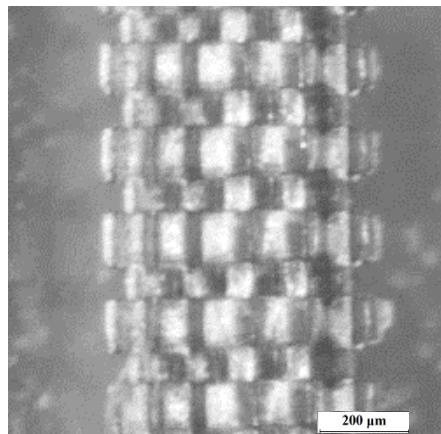
實驗中有使用 DB3 來印製此結構，照片於附錄中之附圖 3，頂部結構清楚透明，但結構經折斷後之斷面因為過度成化而糊成一團，無法看到應有之結構形狀。經多次測試過後，DB5 為較適合印製之配方。



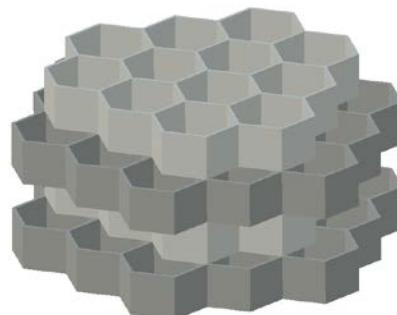
(a)



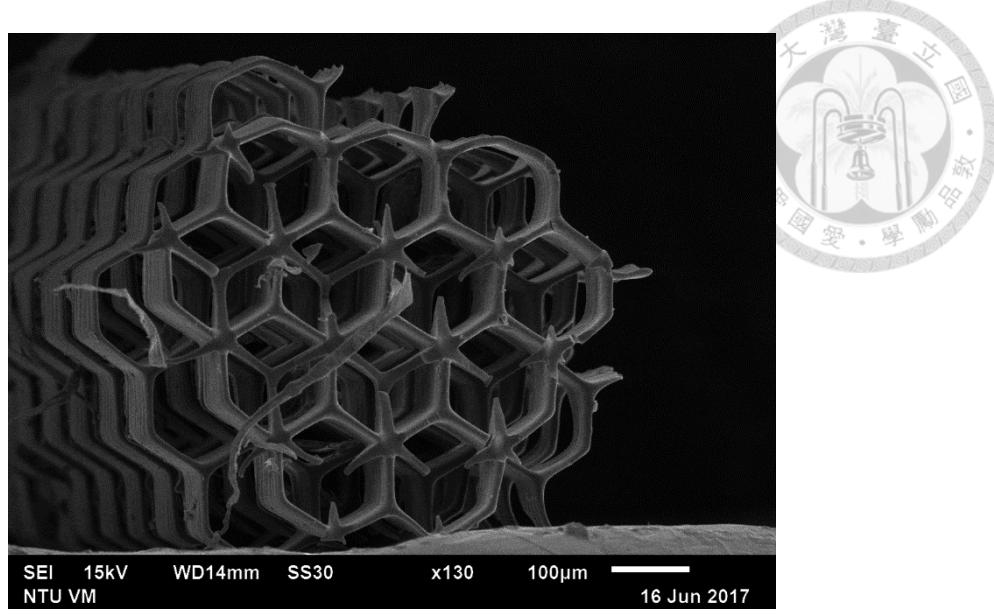
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 5.12 結構-100 樹酯 DB5(a) SEM 拍攝之結構頂部(b)結構設計上視圖(c)光學顯微鏡拍攝之結構側視圖(d)結構設計側視圖(e)SEM 拍攝之結構折斷面

5.2.4 結構 80-5-100

設計尺寸之邊長縮小至 $80\mu\text{m}$ 、線寬縮小至 $5\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $100\mu\text{m}$ ，圖 5.13(a)為結構設計圖之上視圖、(b)為結構設計圖之側視圖。

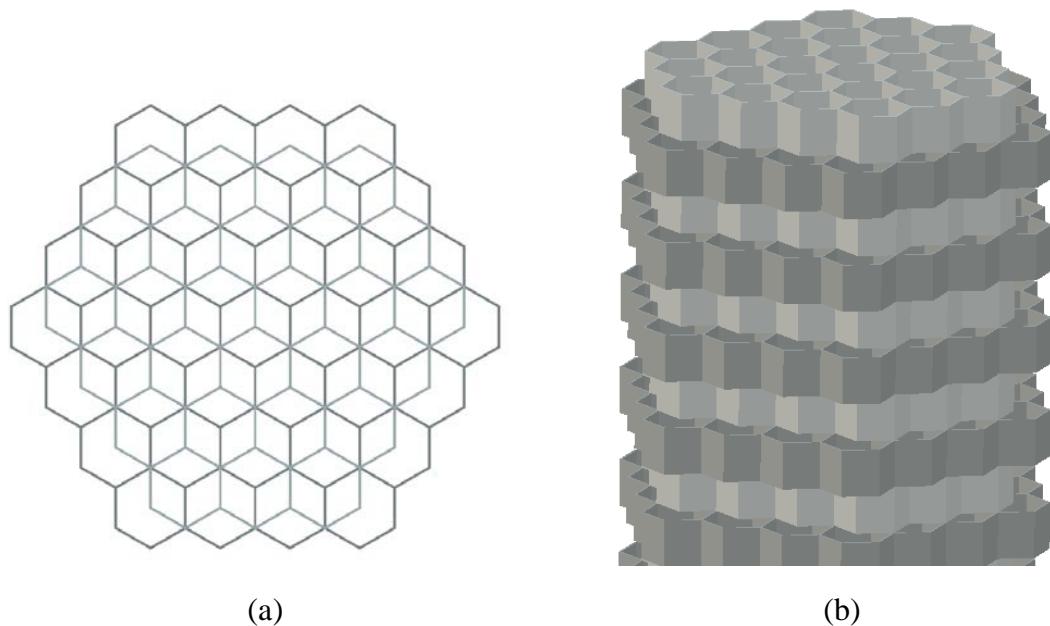


圖 5.13 結構-80 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖



實驗時先後使用了 DB2~DB5 來做測試，因為六角結構之間距縮小，光場互相累加使能量增加，在使用配方 DB2~DB4 時若要列印出通透的頂部結構，相較於之前結構-100、結構-120 的曝光時間，需要再把曝光時間降得更低，降低至 300 毫秒後可以印出清楚且通透之頂部結構。但在做整體的通透性測試時，結構折斷後觀察其斷面發現內部皆有過度成化的現象，推測是因為結構尺寸的縮小，孔距變近導致光場高斯分布疊加明顯，使樹酯對光成化的能力增加，每層曝光不斷累加導致結構內部的過度成化，頂部兩層結構之所以會通透是因為在列印時頂部是最後曝光的幾層，其上未再有其他曝光能量的累加得以保持結構空孔的通透性。DB2~DB4 之結構上視圖與斷面整理於附錄中之附圖 4 至附圖 6。

實驗直到使用 DB5 才能印出通透結構，如圖 5.14(a)所示，切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 500 毫秒的列印參數下所印製之結構頂部上視圖，左上側邊緣處位於光場較弱處導致成化不良，中間部分為光場較強處，六角結構形狀清楚通透且可以看到下一層之輪廓。折斷後之斷面如圖 5.14(b)，斷面處可從空孔中看見下一層之結構輪廓。

相同切層厚度下將曝光時間增加至 800 毫秒，頂部與折斷面如圖 5.15 所示，曝光時間增加了 300 毫秒，原本邊緣處因為光場較弱導致無法成化的結構並沒有因為曝光的時間增加而成化。曝光時間增加至 900 毫秒之結構斷面如圖 5.16，六角形結構輪廓明顯變粗且較不通透，若再將曝光時間往上增加會導致完全不通透。可以說明 DB5 因蘇丹含量的提高而減少了重複曝光導致結構內部的過度成化，但也造成邊緣處因為光場強度較低而產生無法成化的現象。

利用 SEM 量測結構之實際尺寸，曝光時間 500 毫秒印製之六角型結構邊長約為 $66.86\mu\text{m}$ 、線寬為 $8.58\mu\text{m}$ ，如圖 5.17 所示。曝光時間 800 毫秒印製之六角型結構長度約為 $68.26\mu\text{m}$ 、線寬為 $18.29\mu\text{m}$ ，如圖 5.18 所示。曝光時間 500 毫秒之實際印製的邊長量測後發現與理論邊長 $69.3\mu\text{m}$ 相近，實際印製的線寬也與理論線寬 $8.512\mu\text{m}$ 相近，曝光時間由 500 毫秒提高至 800 毫秒使實際線寬增加了 $9.71\mu\text{m}$ 。

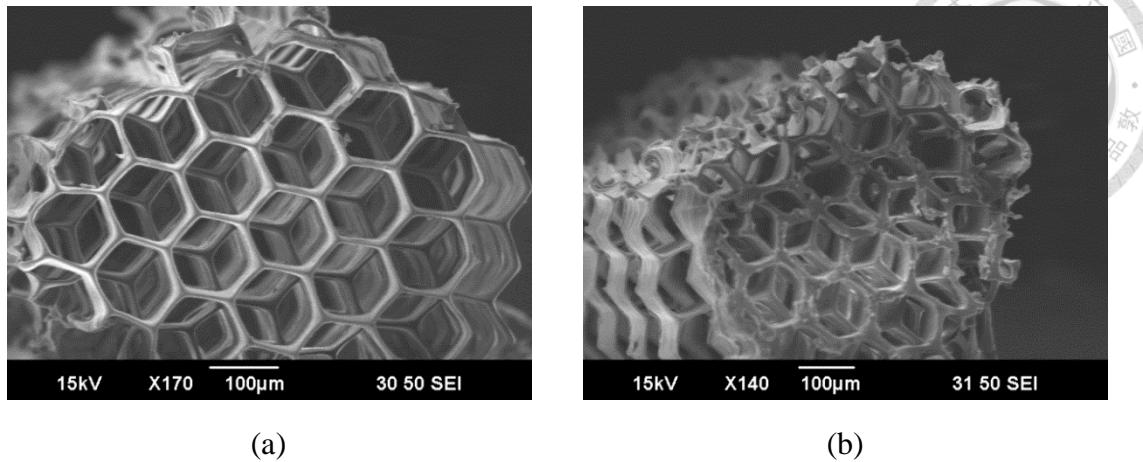


圖 5.14 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面

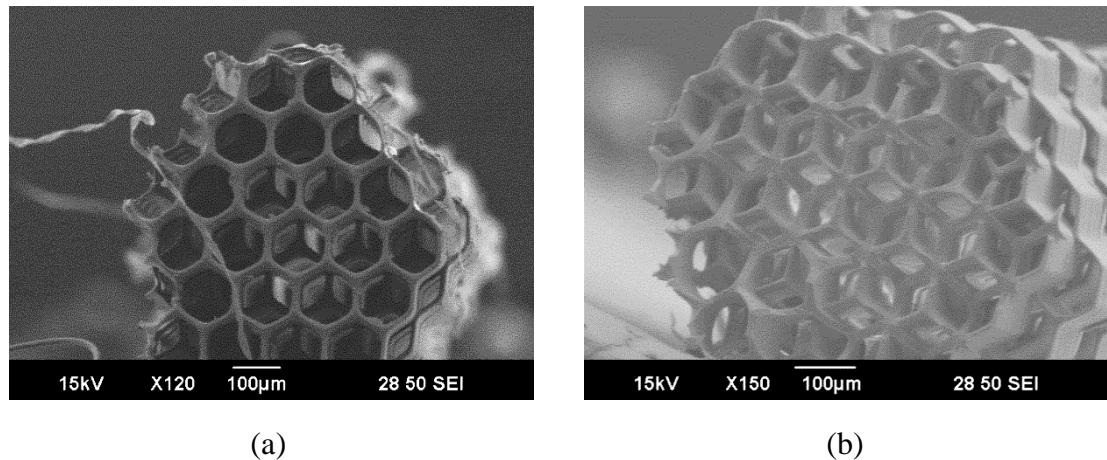


圖 5.15 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構 (a)頂部(b)折斷面

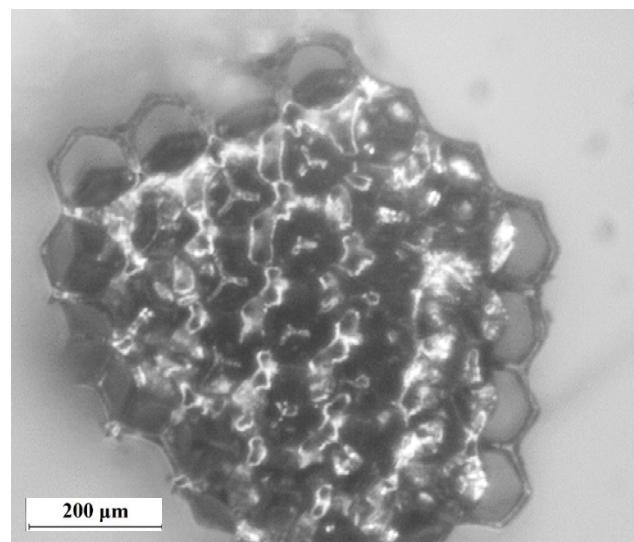


圖 5.16 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 900 毫秒列印之結構折斷面

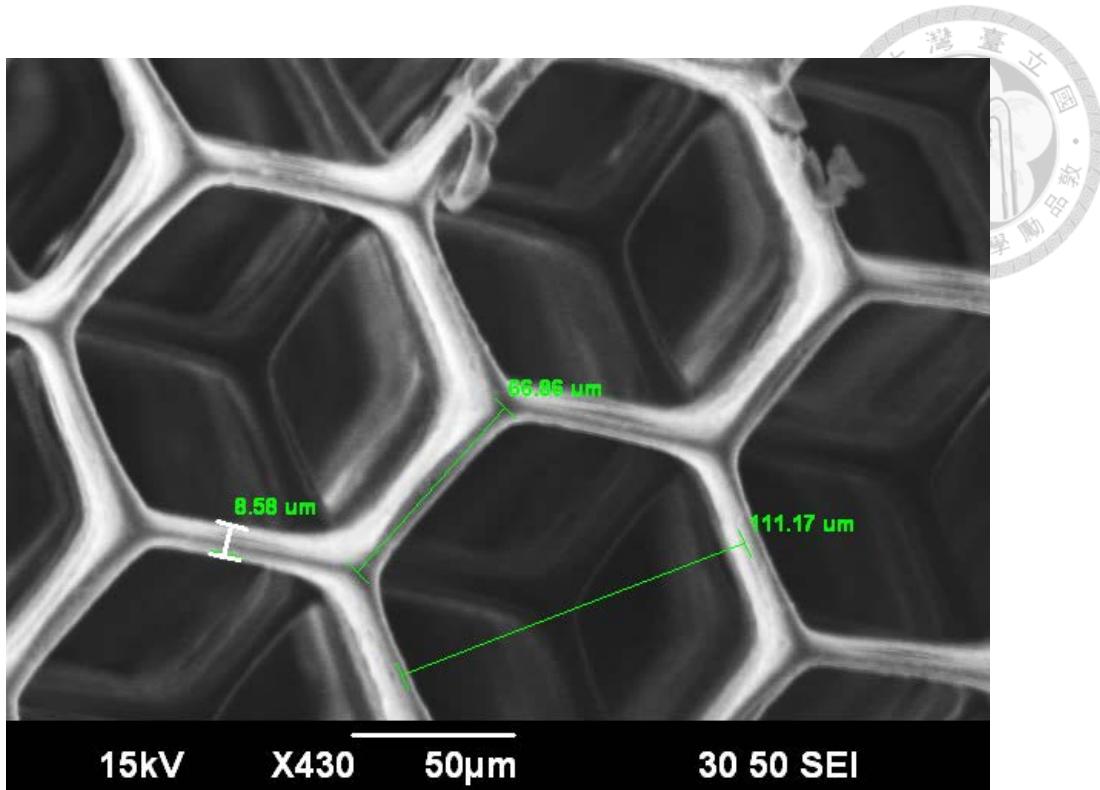


圖 5.17 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 500 毫秒列印之結構尺寸

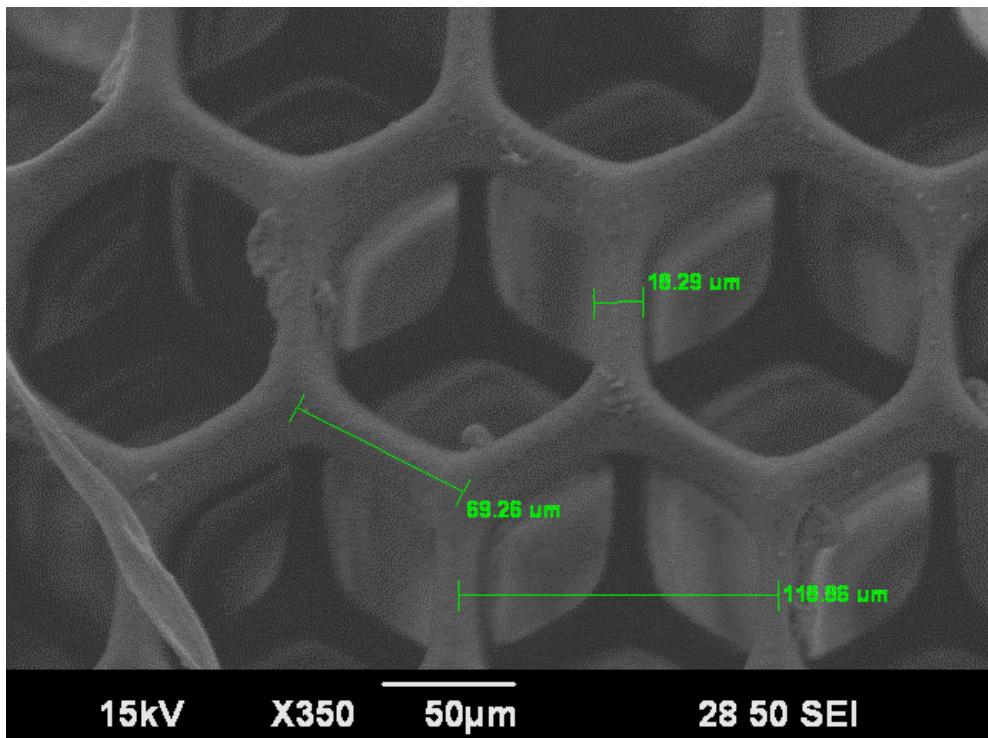


圖 5.18 結構-80 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒列印之結構尺寸



5.2.5 結構 50-5-50

設計尺寸之邊長縮小至 $50\mu\text{m}$ 、線寬 $5\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $50\mu\text{m}$ ，結構設計上視圖與側視圖如圖 5.19(a)、(b)所示。

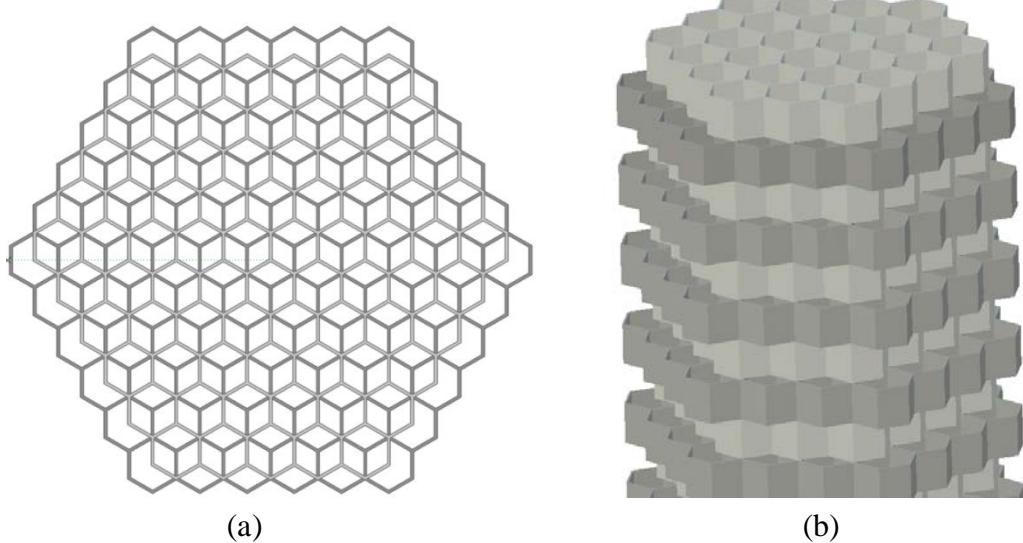


圖 5.19 結構-50 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖

先前列印的成果中，DB0~DB4 在尺寸縮小後結構通透度不佳，因此省略這部分的參數測試，直接使用 DB5 來做列印，實驗中發現若將切層厚度由 $4\mu\text{m}$ 提高至 $5\mu\text{m}$ ，會減少因為重複曝光而導致的垂直方向過度成化，故切層厚度設定為 $5\mu\text{m}$ ，曝光時間由 500 毫秒開始做測試，並依列印結果逐次遞減。500 毫秒所印製的斷面其結構空孔中有多餘的樹酯成化，無法看出應有的結構輪廓，嘗試過使用超音波震盪機震 5 分鐘但並無改善。降低曝光時間至 400 毫秒，其斷面雖可看出六角形結構輪廓，但線寬較粗且空孔中有過度成化的樹酯，故可判定為不通透之列印參數。400、500 毫秒列印的結構折斷面圖整理於附錄中之附圖 7、附圖 8。

降低曝光時間至 300 毫秒所印製出的結構斷面如圖 5.20 所示，圖中可以看到斷面中間光場較強，使結構之線寬較外側的粗，雖然結構空孔並無多餘的樹酯成化，但因為列印出來的線寬增加使結構形狀不符預期。因此再將曝光時間降低至 200 毫秒，經過多次列印測試後皆無法印出成型，故 300 毫秒為 DB5 之最佳列印參數。

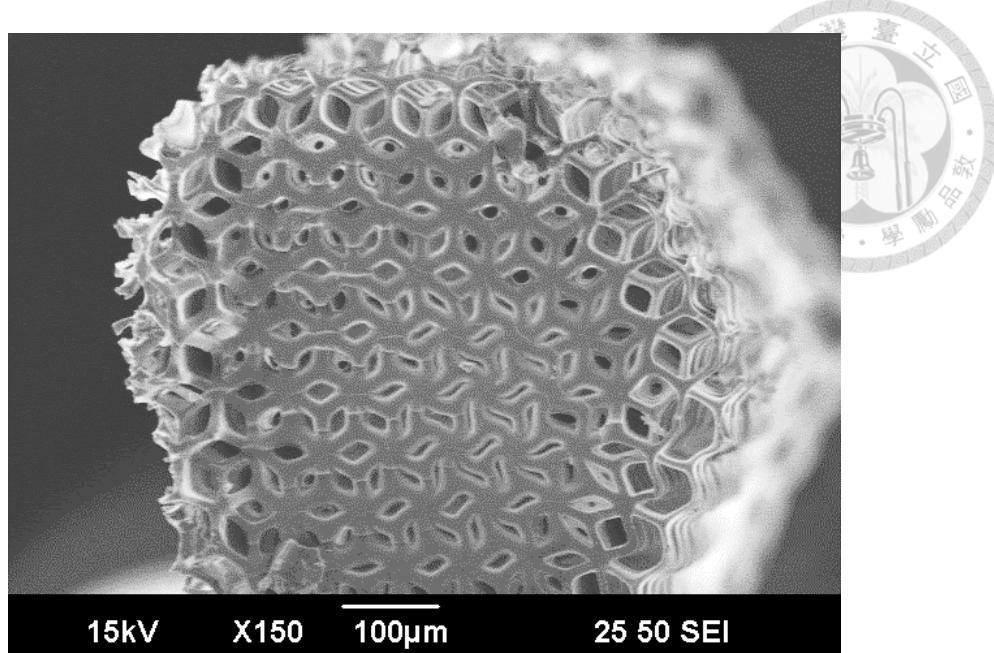


圖 5.20 結構-50 樹酯 DB5、曝光時間 300 毫秒列印之結構折斷面

列印上 DB5 之效果不符預期，因此嘗試增加蘇丹含量並比較列印出來之結構斷面通透結果。使用 DB6 來做列印測試，切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間 500 毫秒列印之結構斷面與 DB5 曝光時間 300 毫秒列印之斷面相似，雖然可以看出結構輪廓但線寬較粗不符合預期，斷面圖整理於附圖中之附圖 9。

同樣切層厚度下，將曝光時間降低至 400 毫秒，列印的結構頂部如圖 5.22(a)、折斷面如圖 5.21(b)所示，從斷面可看出清楚之六角結構特徵，結構形狀的扭曲是因為在折斷時受到擠壓變形。雖然可以說此參數下所列印之結構通透，但從頂部的局部放大圖中可以看到六角形結構的空孔已經產生圓角，此配方的光抑制劑含量不足以吸收過多的 Dark cure 現象，若要能印出理想之結構形狀需要再將蘇丹的含量提高。

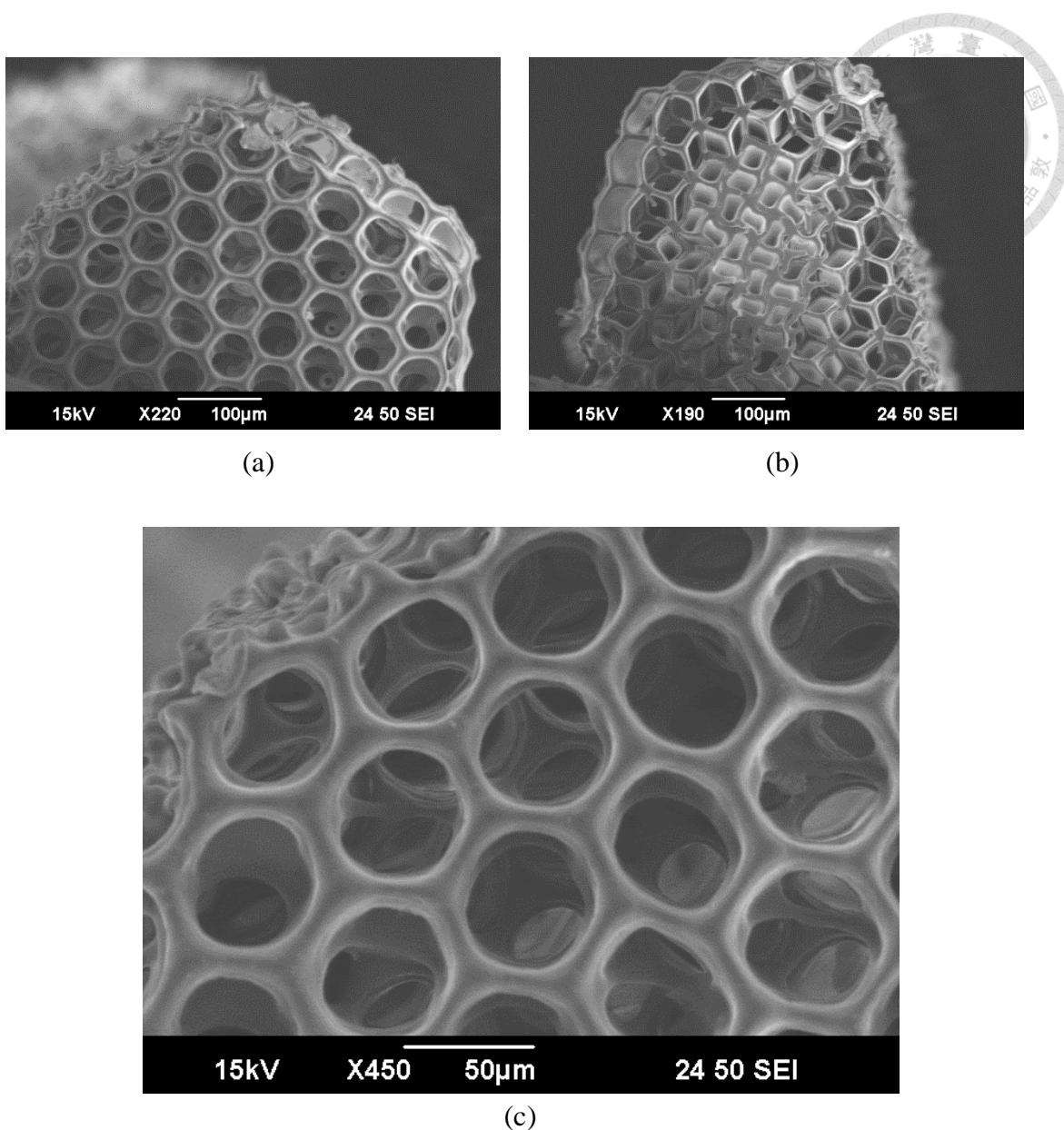


圖 5.21 結構-50 樹酯 DB6、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面(c)頂部局部放大圖

提高蘇丹含量使用 DB7 來印製，實驗中發現蘇丹含量的提高會導致樹酯成化不易，若玻片上的樹酯初始液面太厚，在一開始列印底部的幾層結構會因為穿透不足而無法成化於玻片上，往後的每層曝光成化也都無法依序建構堆疊上去，最後會印不出整體結構，經多次測試後發現若要成功印出結構必須將初始液面刮薄並將底層的曝光時間加長至 1000 毫秒以上，底層結構與玻片成功黏上後繼續往上堆疊才能成功。圖 5.22(a)為切層厚度 5 μm 、曝光時間 400 毫秒的列印參數下之結構頂



部，而頂部之結構形狀已經從 DB6 的圓角大幅改善較為銳利之六角形；圖 5.22(b) 為結構斷面，斷面因為是折斷面所以表面不太平整，但從空孔中可以看到下一層之結構，並無其他過度成化的現象，故可判定它是通透的。利用 SEM 量測此結構之實際尺寸如圖 5.23 所示，邊長 41.52 μm 比理論尺寸 43.3 μm 短約 2 μm ，而實際線寬 6.34 μm 較理論線寬 5.32 μm 寬約 1 μm 。附圖 10 為 DB7 在相同切層厚度、曝光時間 500 毫秒之結構折斷面。

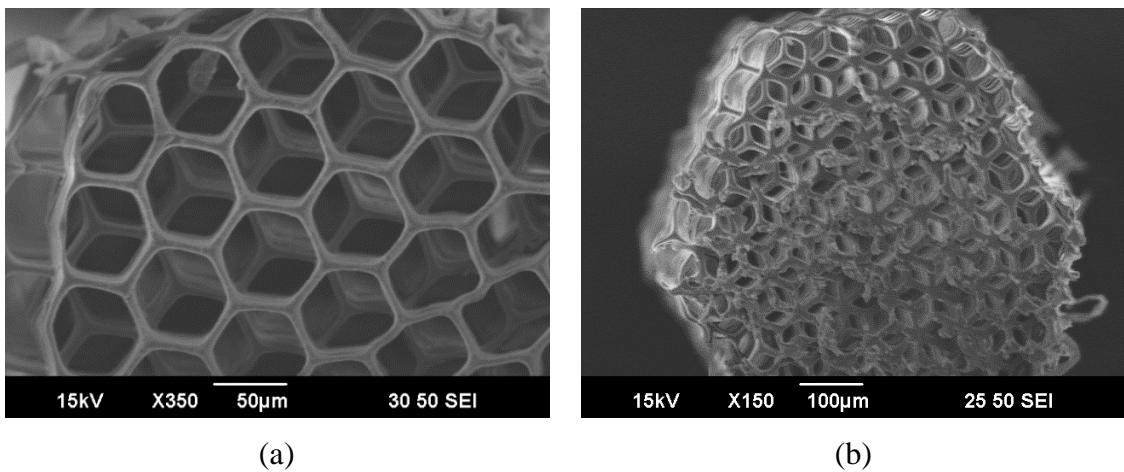


圖 5.22 結構-50 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部圖(b)折斷面

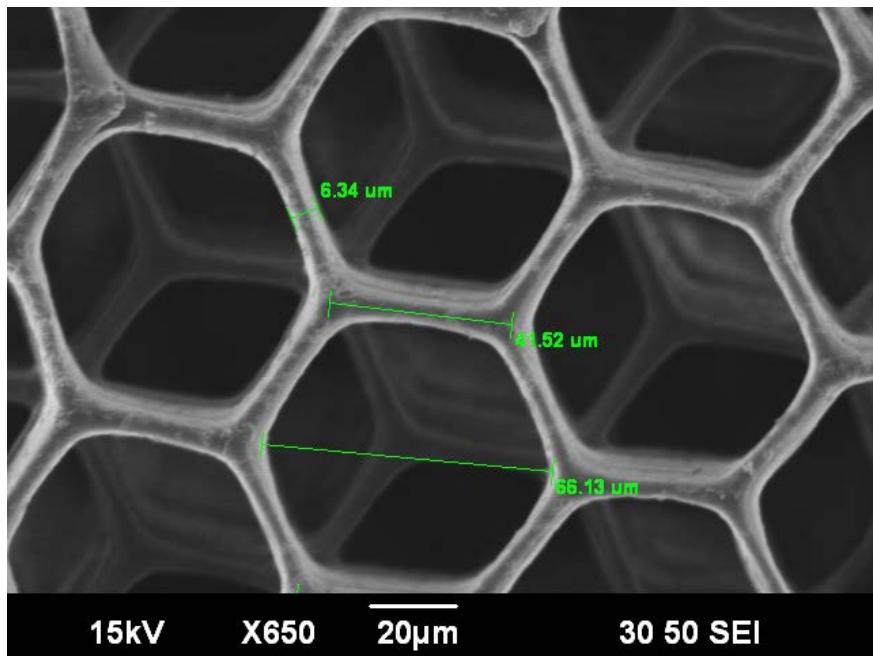


圖 5.23 結構-50 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構尺寸



5.2.6 結構 40-5-40

設計尺寸之邊長縮小至 $40\mu\text{m}$ 、線寬維持 $5\mu\text{m}$ 、六角型單層高度 $40\mu\text{m}$ ，結構設計上視圖與側視圖如圖 5.24(a)、(b)所示。

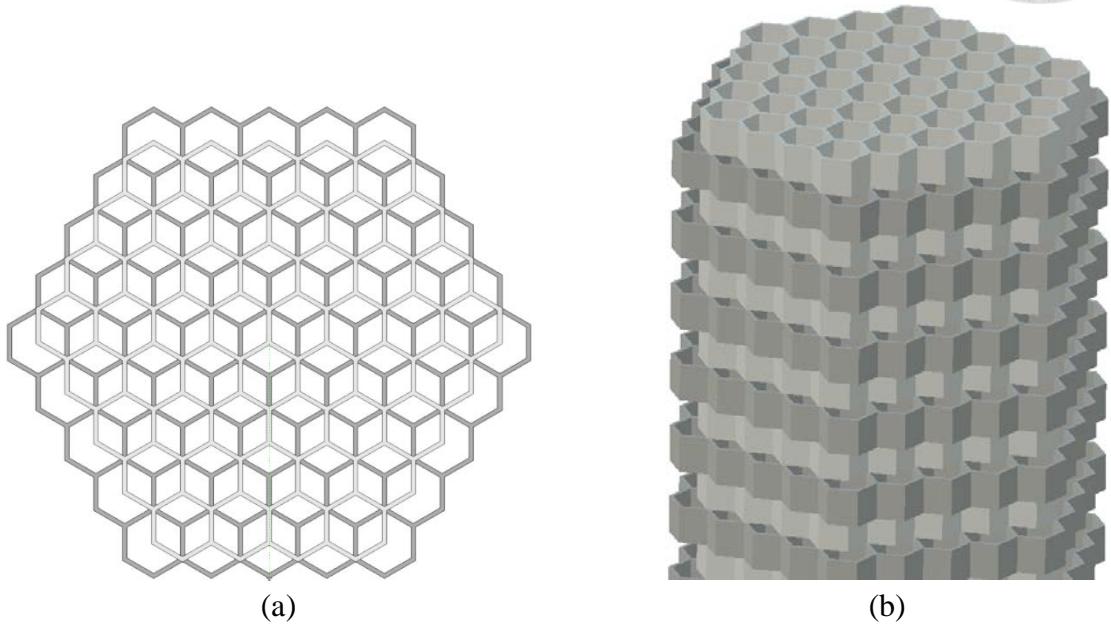


圖 5.24 結構-40 之(a)設計上視圖(b)設計側視圖

依據先前的經驗，直接使用 DB7 來印製結構-40，切層厚度設定為 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間從 500 毫秒開始測試並依據印製出來的結果調整列印參數。曝光時間 500 毫秒下印製之結構頂部如圖 5.25 所示，(a)為在金相顯微鏡下所拍攝之結構頂部圖、(b)為在電子顯微鏡下所拍攝之結構頂部圖，兩張圖比較後發現在金相顯微鏡下拍攝之結構輪廓較為清楚且為銳利之六角形，而在電子顯微鏡下拍攝之結構輪廓為有圓角之六角形，會有此現象是因為金相顯微鏡在越大的放大倍率下拍攝其景深越淺，只能對焦在一固定平面上，故圖 5.25(a)對焦到的是結構頂端；而用 SEM 拍攝之景深較深，可同時對焦上層至下層之結構，故圖 5.25(b)所拍攝到的圓角為六角形結構下層之壁厚，從側面來看壁厚在深度方向之實際成化情形示意如圖 5.26 所示。利用 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形來做驗證，如圖 5.27 所示，與 SEM 拍攝的照片結果相似，六角形夾角處皆有圓角。

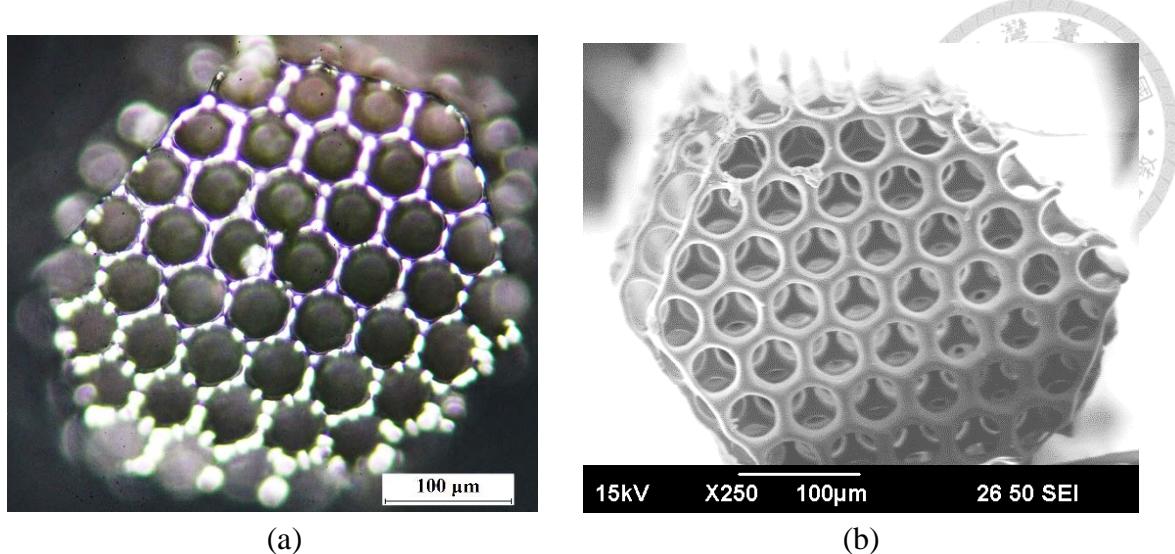


圖 5.25 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部並使用(a)金相顯微鏡(b)SEM 拍攝

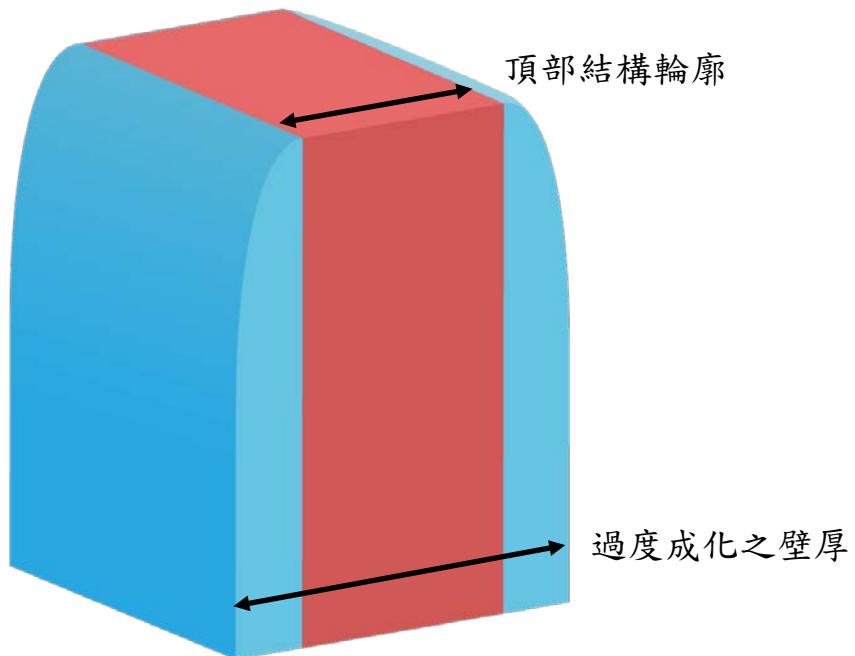


圖 5.26 實際印製之壁厚情形示意圖

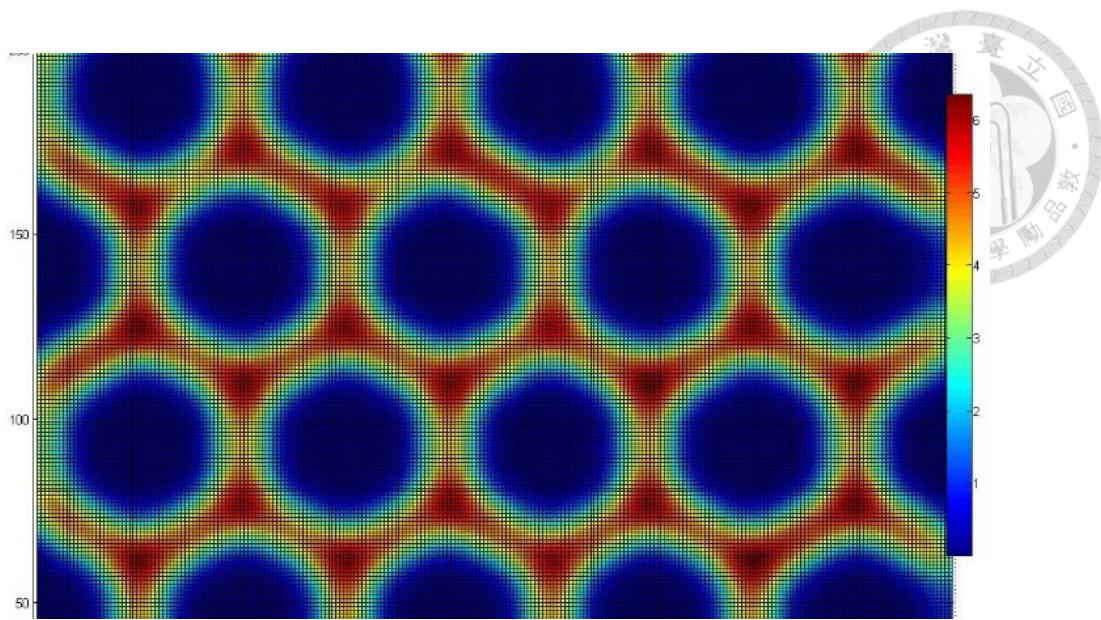


圖 5.27 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形

實驗中發現，相對於較大尺寸之結構而言，結構-40 較軟以至於無法直接將其折斷，有較好的韌性，彎折過後會回復成原本形狀。因此嘗試不同方法來截取斷面以觀察結構內部是否通透。圖 5.28 為使用美工刀在常溫下直接切斷結構之斷面，斷面中間因為結構太軟，在刀片切下去的同時受到擠壓變形。故嘗試將印製完的結構放置於-20°C 之冰櫃二至三小時，冷凍過後結構變脆再將其切斷。切斷面如圖 5.29 所示，可以看到冷凍後之結構切斷後內部已無受到擠壓產生的壓縮變形，斷面圖中右側有結構破損的現象，推測是因為刀刃不夠銳利導致的破壞，但不至於影響整體通透性的判斷，雖然結構斷面之線寬較粗，但六角形空孔之輪廓清晰且無過度成化的樹酯，因此可判定為通透之結構。並嘗試多組印製多組結構皆經冷凍過後再作切斷，其斷面圖整理於附圖中之附圖 11、附圖 12。

量測結構-40 實際印製之尺寸如圖 5.30 所示，六角形邊長 28.81 μm 較理論邊長 34.46 μm 短 5.65 μm ，實際線寬分別量測頂部(圖中深色輪廓)寬度與下層壁厚(圖中淺色輪廓)處寬度約，頂部線寬為 5.24 μm 與理論線寬 5.32 μm 厚度相近，下層壁厚為 13.42 μm 較理論線寬粗約 8 μm 。

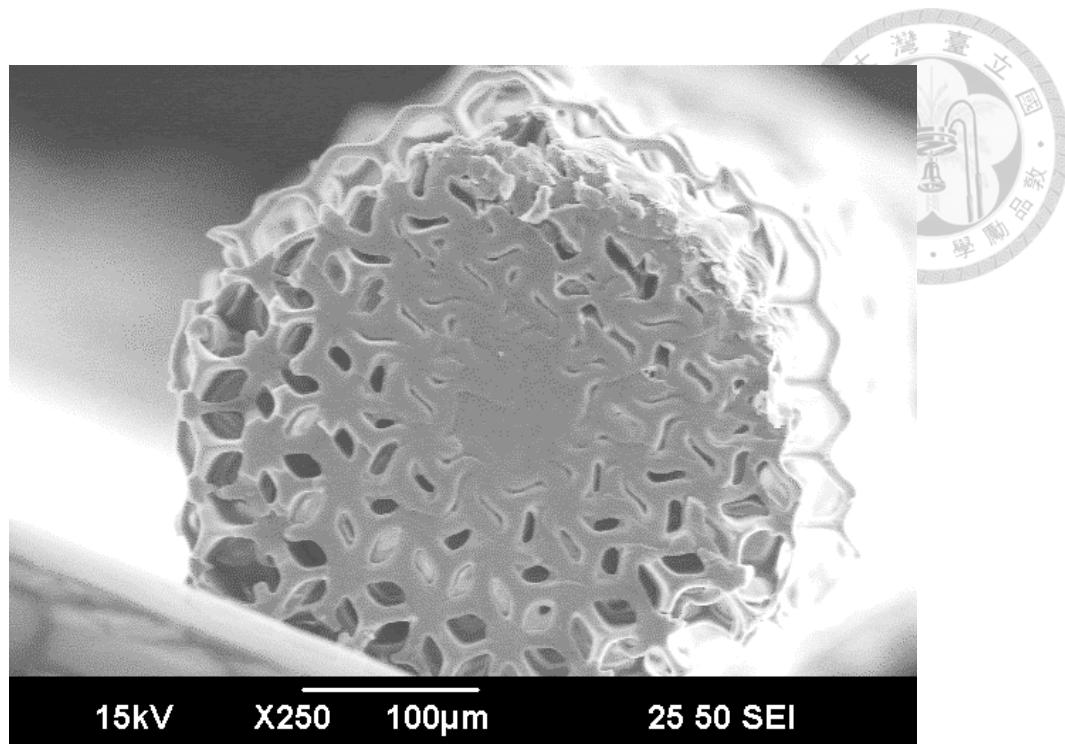


圖 5.28 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構在常溫下切斷之斷面

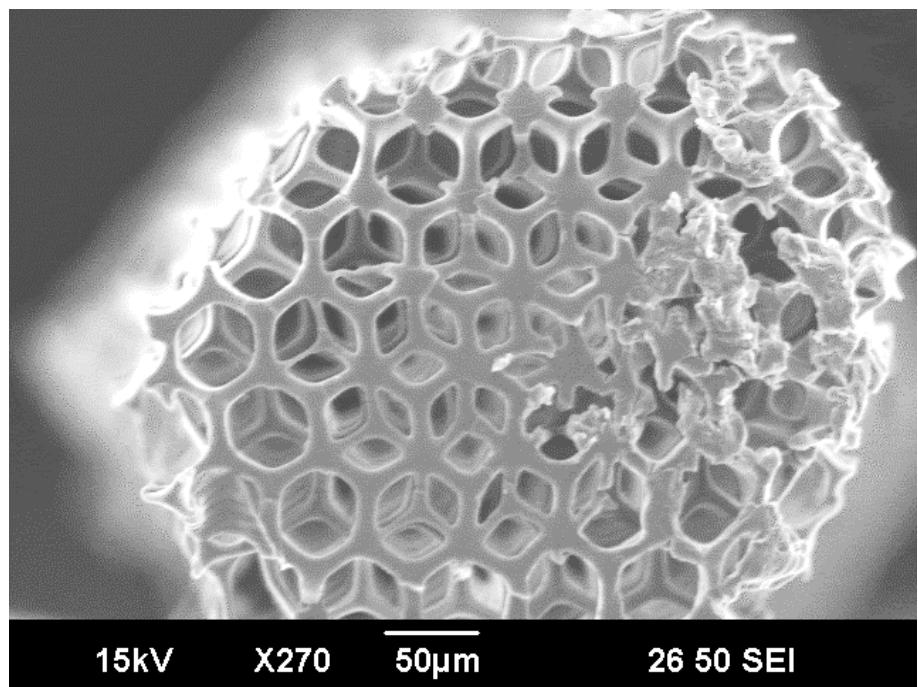


圖 5.29 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構在-20°C冷凍後切斷之斷面

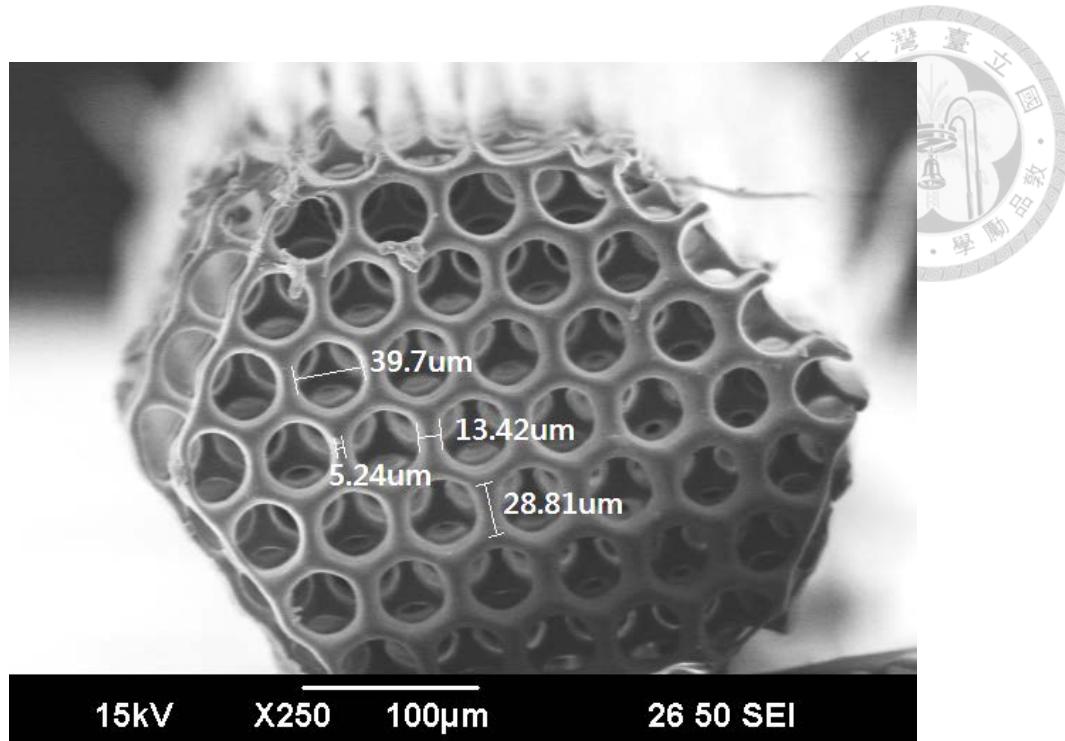


圖 5.30 結構-40 樹酯 DB7、曝光時間 500 毫秒列印之結構尺寸

5.2.7 結構 30-4-30

繼續縮小結構設計邊長至 $30\mu\text{m}$ 、線寬縮小至 $4\mu\text{m}$ 、六角形單層高度 $30\mu\text{m}$ 。

依據經驗樹酯直接使用 DB7 作為初始測試之配方，切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間從 500 毫秒開始列印並依據結果做調整，曝光時間 500 毫秒之斷面圖放置於附錄中之附圖 13。實驗中發現雖然頂部可印出清楚之結構圖形，但因為線寬縮小的關係，使光場邊緣處之結構成化不易，若為了印出邊緣結構而將曝光時間提高會導致結構整體過度成化。曝光時間 400 毫秒所列印之結構頂部如圖 5.31(a)所示，雖然有清楚之結構輪廓，但從其折斷面圖 5.31(b)可以看到空孔中已經完全成化看不出六角形結構，經過多次測試改變曝光時間皆無法有效的改善不通透的問題。

起初認為是有樹酯殘留在孔洞中，因為空孔太小不容易清洗乾淨導致斷面有殘留樹酯，後續有繼續成化的現象，故嘗試把結構在超音波震盪機震盪的時間提高，斷面成化的現象不但沒有改善，反而破壞了頂部之結構如圖 5.32，推測是因為列印之線寬縮小，印出來的結構壁厚變薄，在長時間震盪下容易使結構破損，大約震 2~3 分鐘就必須將結構取出。

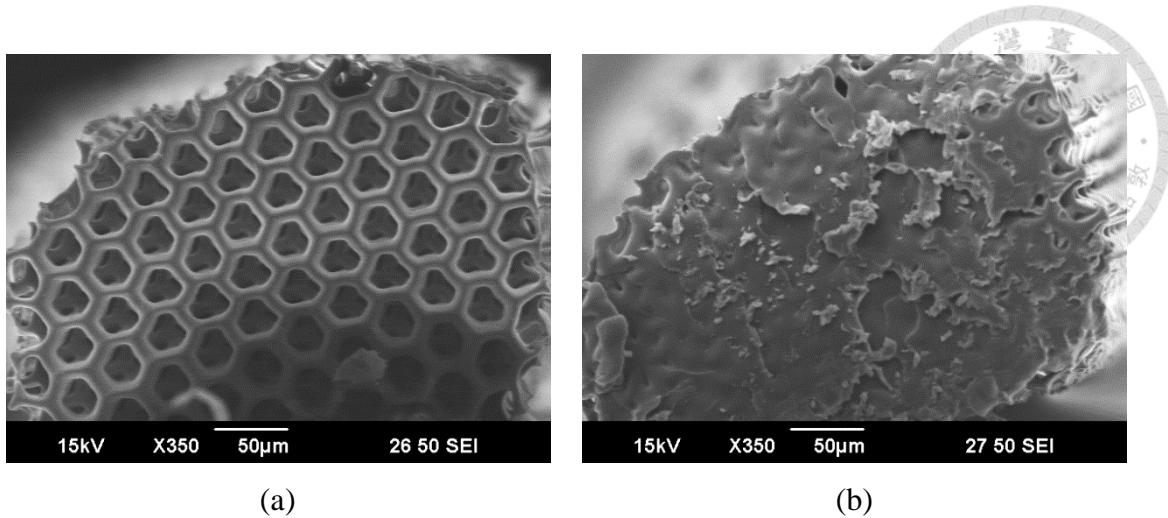


圖 5.31 結構-30 樹酯 DB7、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面

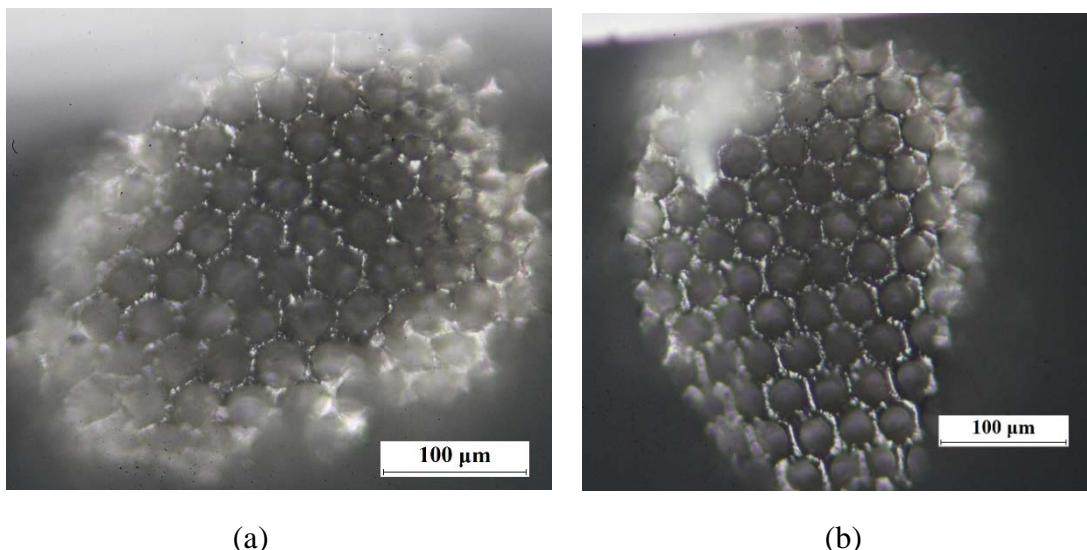


圖 5.32 使用超音波震盪機震盪(a)5 分鐘(b)10 分鐘 產生頂部結構破損

蘇丹含量提高至 0.35g，使用 DB8 來印製，此配方下因為蘇丹含量的提高，投影光對樹酯的穿透力下降，導致每次曝光固化產生的結構薄膜太薄難以堆疊形成結構，測試多組切層為厚度 5μm，並將底層曝光時間增加至 2000 毫秒為了讓結構底部黏在玻片上，持續提高每層曝光時間皆無法成功印出完整結構。

因此把切層厚度減少成 4μm 來做曝光時間參數測試，雖然可以成功印出完整結構，但在此配方下初始液面高度的調整對結構印製的結果極為重要，若初始液面太高或太低都會使投影機之影像平面無法剛好對焦在樹酯表面，曝光時間低約



400~600 毫秒因為能量不足導致成化不易，最終會印不出結構；曝光時間長約 700~900 毫秒能量足以穿透並成化，但頂部之結構會因為過度成化而糊成一團。此調整初始液面高度為人為因素，每次調整狀況皆不相同，些微的差異也會對結構印製的結果有明顯的影響。實驗中不斷嘗試，調整至較好的液面高度後可在曝光時間 500 毫秒的參數下列印出完整結構如圖 5.33(a)所示，結構經-20°C 冷凍後切斷之斷面如圖 5.33(b)所示，可從斷面清楚看到上下兩層結構輪廓及空孔，圖中右側為結構切斷時造成的破損，就整體斷面而言在此參數下是可印出通透結構的。同樣參數下因為初始液面的差異會使結構印製之結果不同，附圖 14 為同樣切層厚度及曝光時間下所印製之結構頂部圖，附圖 15、附圖 16 為同樣參數下列印之結構斷面圖。

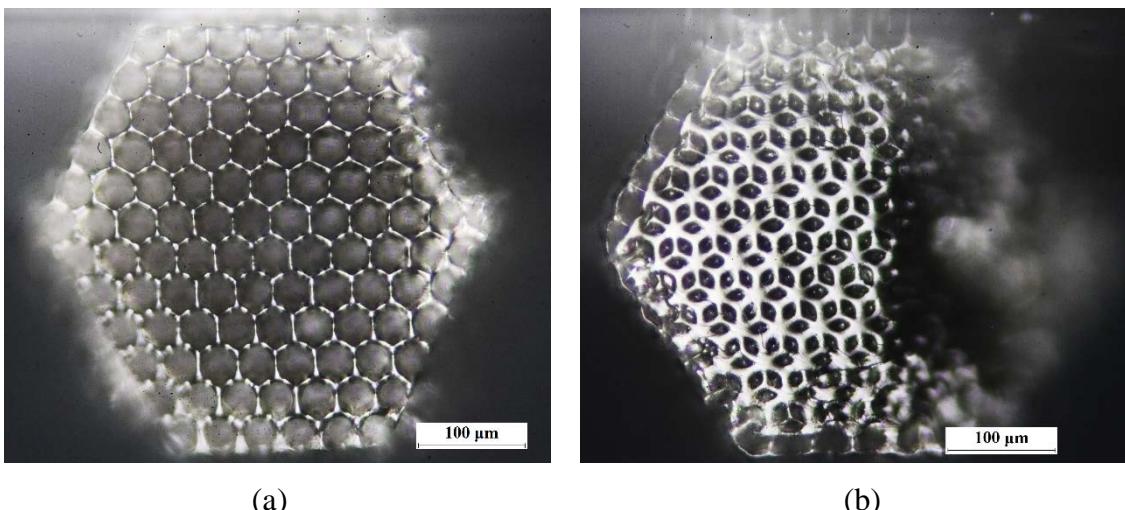


圖 5.33 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面

量測結構尺寸如圖 5.34(a)頂部與(b)斷面，六角形實際邊長 21 μm 較理論邊長 25.98 μm 短約 5 μm ，頂部輪廓線寬 2.84 μm 較理論線寬 4.26 μm 細 1.42 μm ，斷面量測較細之線寬 3.41 μm 、較粗之線寬約 6~8 μm 。SEM 量測之結構頂部尺寸與局部放大圖如圖 5.35 所示，比較光學顯微鏡與電子顯微鏡拍攝之結果後發現與結構-40 同樣有圖 5.26 的現象，下層過度成化導致變寬之壁厚量測為 13.32 μm ，較頂部輪廓線寬粗約 11 μm ，較理論線寬粗約 9 μm 。頂部空孔寬度約為 36.13 μm ，下層空孔寬度 21.95 μm 為結構實際有通透之寬度。

根據上述結果得知雖然提高蘇丹含量至 DB8、設計線寬縮小至 $4\mu\text{m}$ ，但因為結構間距縮小的關係，使得整體光場亮度因為高斯分布互相疊加的影響而增強，利用 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形如圖 5.36 所示，模擬與列印結果相似，可以說明下層結構過度成化所產生的圓角現象，為光場疊加後能量較強處曝光造成。

依據先前經驗，繼續提高蘇丹含量可以改善圓角現象，但也因此大幅影響成化厚度，增加列印難度。實驗中嘗試使用 DB9 印製此尺寸結構，在同樣切層厚度下，曝光時間需要提高至 800 毫秒以上並將底層曝光時間提高至 2000 毫秒才能印出中間光場較強之一小部分結構，經多次測試後發現曝光時間往上提高皆無法有效地印出完整結構，而樹酯初始液面若無法調整至最佳高度皆無法成功列印，此配方大幅降低結構-30 對樹酯之成化能力，不適合當作將來列印試片之配方。

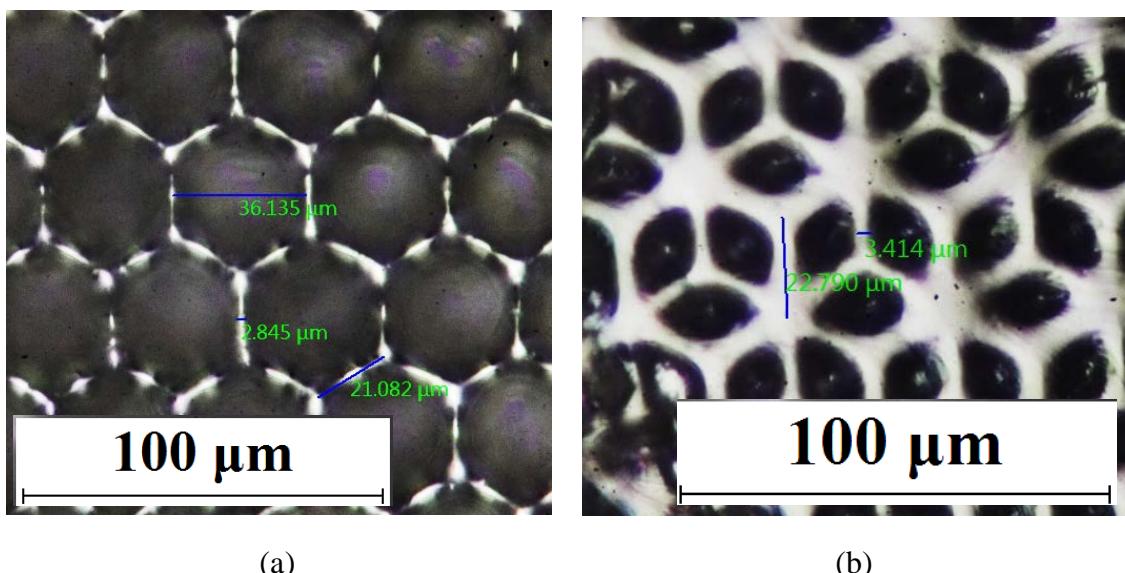


圖 5.34 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構(a)頂部(b)折斷面尺寸

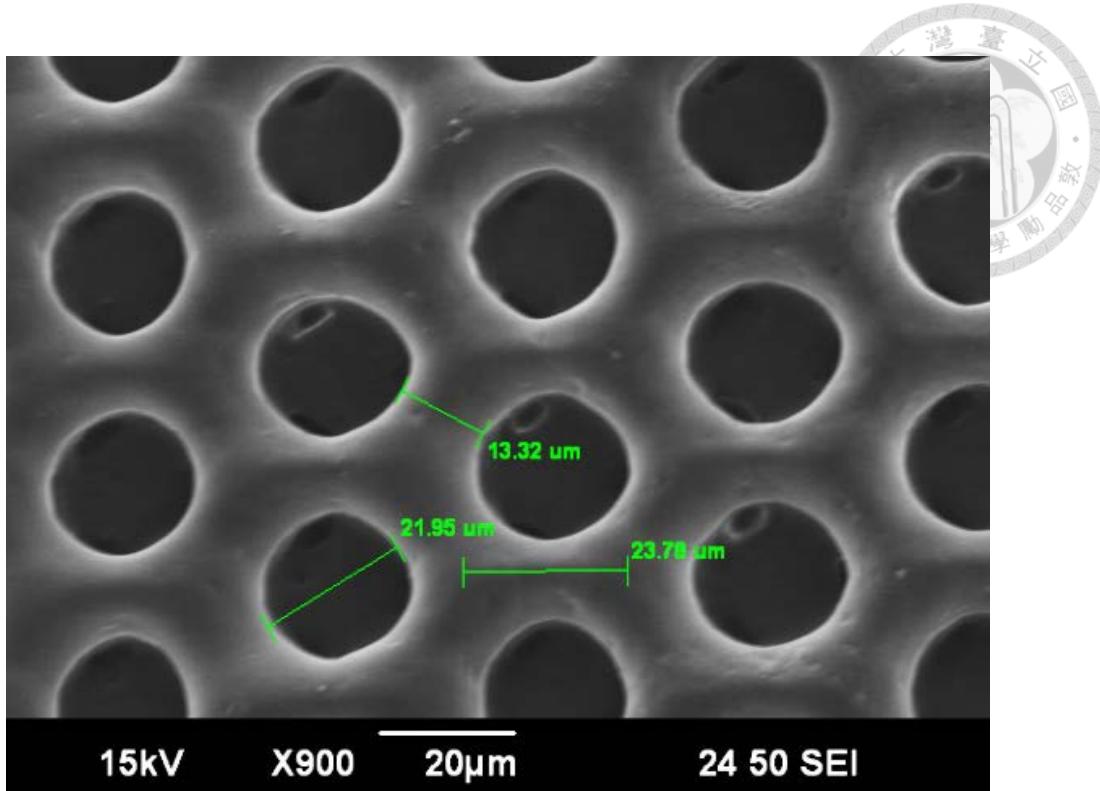


圖 5.35 結構-30 樹酯 DB8、曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部尺寸

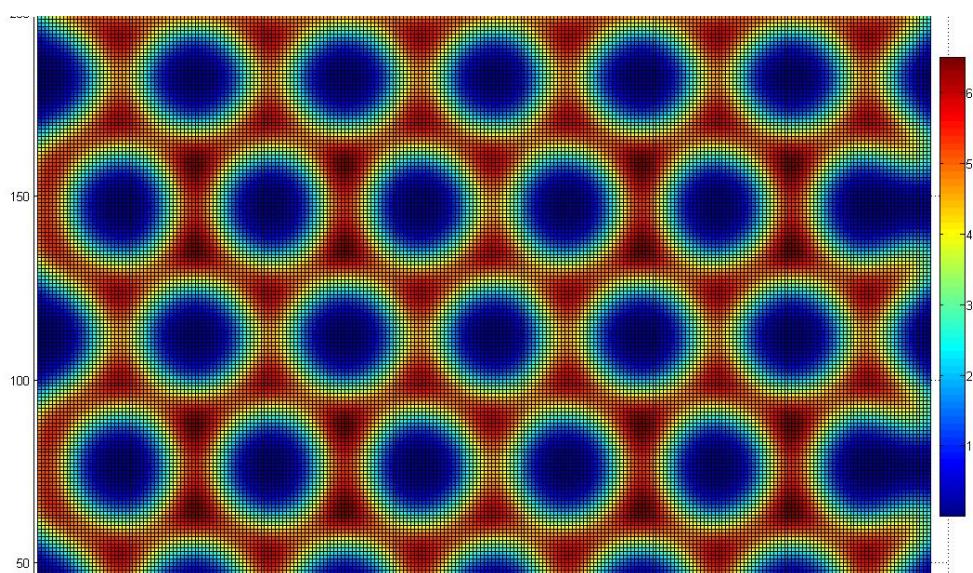


圖 5.36 使用 MATLAB 程式模擬高斯光場疊加情形



5.2.8 結構 20-4-20

繼續測試可印製之最小尺寸結構，結構設計邊長縮小至 $20\mu\text{m}$ 、線寬 $4\mu\text{m}$ 、六角形單層高度 $20\mu\text{m}$ 。直接使用 DB8 來做列印，切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間從 500 毫秒開始測試，多次測試後發現將曝光時間降低至 300 毫秒也可以印出結構，但在顯微鏡下觀測其結構頂部可明顯發現不通透，使用金相顯微鏡拍攝如圖 5.37 所示，無法從空孔中看到下一層之結構輪廓，初步認為是有樹酯殘留並使用超音波震盪機震，震 5 分鐘後發現結構被破壞產生裂縫，空孔中樹酯並未去除，因此判定為樹酯已成化。嘗試降低曝光時間至 200 毫秒及將切層厚度提高至 $5\mu\text{m}$ 減少重複曝光，經過多次實驗調整皆無法成功印出結構，故結構-20 在樹酯 DB8 之配方下，切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 500 毫秒可印出結構但不通透。

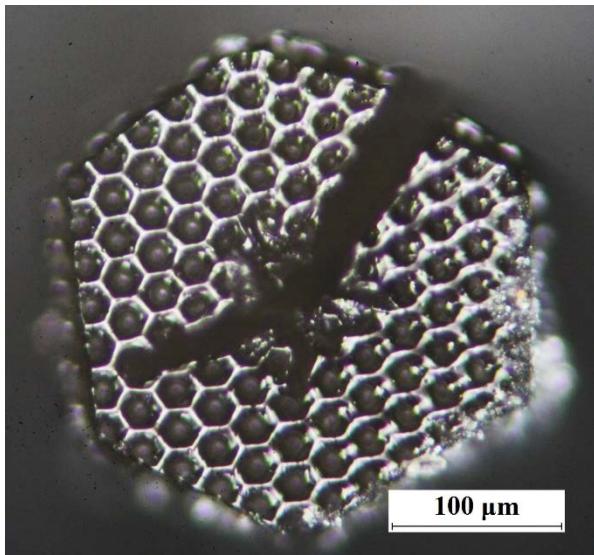
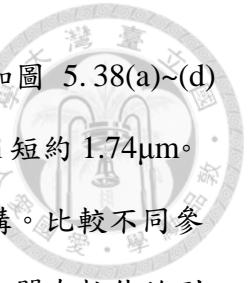


圖 5.37 結構-20 樹酯 DB8、曝光時間 300 毫秒列印並使用超音波震盪機震五分鐘之結構頂部

因 DB8 無法成功印出理想結構，故嘗試使用 DB9 來作列印，依據結構-30 之測試結果，此配方會因為初始液面調整不佳而印不出結構，底層液面太厚也會導致無法成化於玻片上，故在列印先把底層液面刮薄，結構增加底座當作犧牲層，並將底層曝光時間設定為 2500 毫秒、切層厚度 $4\mu\text{m}$ ，實驗中每層曝光時間從 600 毫秒



開始並依列印結果降低至 350 毫秒，使用金相顯微鏡拍攝結構頂部如圖 5.38(a)~(d) 所示，量測結構頂部之尺寸實際邊長為 $15.46\mu\text{m}$ ，較理論邊長 $17.2\mu\text{m}$ 短約 $1.74\mu\text{m}$ 。當曝光時間降低至 300 毫秒以下，多次列印後皆無法成功印出結構。比較不同參數下所列印的結構頂部之六角形輪廓，曝光時間在 350~500 毫秒之間有較佳的列印效果。實驗中嘗試使用切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、每層曝光時間 $400\sim 800$ 毫秒之列印參數皆無法成功印出結構，提高至 1000 毫秒以上僅有部分結構成化且成功向上堆疊。

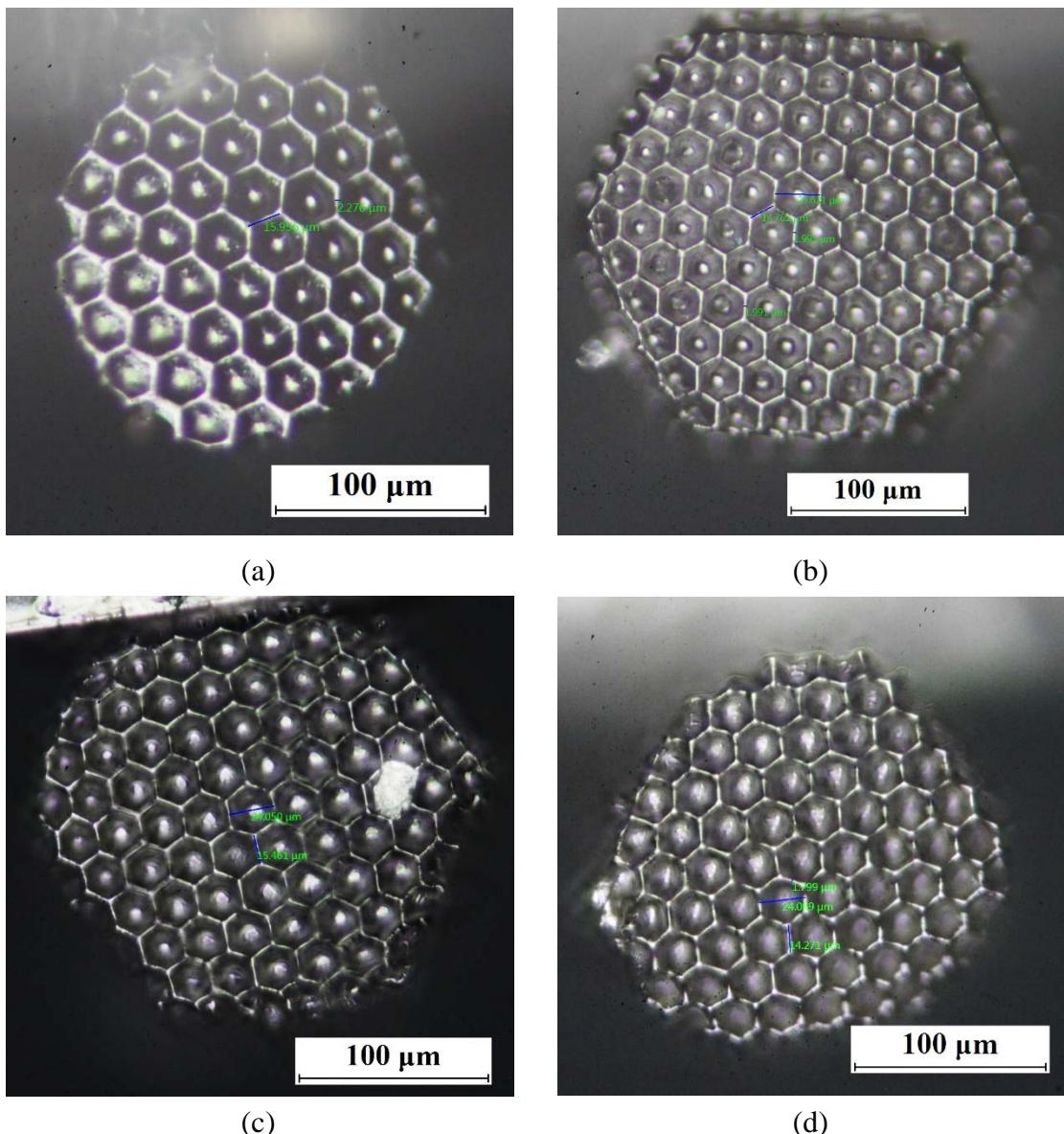


圖 5.38 結構-20 樹酯 DB9、切層厚度 $4\mu\text{m}$ (a) 曝光時間 600 毫秒 (b) 曝光時間 500 毫秒 (c) 曝光時間 400 毫秒 (d) 曝光時間 350 毫秒 列印之結構頂部



為了便於夾持結構並將其折斷，加大結構成型之總面積，並採用較佳之列印參數-切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時 350~500 毫秒來印製，將結構整體高度增加，折斷後觀察其斷面以判定結構是否通透。實驗中使用液態氮冷凍結構使其變脆，並在液態氮中折斷以確保斷面不會受到擠壓變形而破壞結構完整性。

圖 5.39 與圖 5.40 分別為曝光時間 350 與 400 毫秒由 SEM 拍攝之影像圖，圖(a)-(c)分別為結構頂部、斷面與局部放大圖。從頂部圖與局部放大圖可以看到結構之輪廓與空孔，但無法從空孔中看見下一層之結構。由圖 5.39(c)可以明顯看到因為結構孔距縮小而導致先前 5.2.6 小節所述圖 5.23 之現象更加嚴重，量測得到下層壁厚($12.57\mu\text{m}$)較孔距($9.77\mu\text{m}$)寬約 $2.8\mu\text{m}$ ，與原本設計的結構比例差異甚大。將兩組參數所印製之結構在液態氮中折斷後，斷面如圖 5.39(b)與圖 5.40(b)所示，可以看到兩組結構斷面皆為光滑表面已無六角型輪廓，可以得知其內部結構已完全成化。實驗中列印過許多組，曝光時間皆為 400 毫秒，用 SEM 拍攝之結構頂部圖整理於附錄中的附圖 17 至附圖 19；同樣參數下列印之結構斷面圖整理於附錄中的附圖 20 至附圖 24，皆有以上所述之現象。

從上述結果中，無法判定斷面完全成化的現象是否為殘留樹酯未清洗乾淨而成化，還是在列印結構時影像圖形的曝光就已經造成內部的成化。故嘗試使用不同溶劑來清洗印製完成的結構，並比較不同溶劑對結構頂部及折斷面之影響。

將印好的結構泡在丙酮裡三天，使其有更多時間可以溶解出空孔裡殘留的樹酯，並使用超音波震盪機震盪 5 分鐘，取出後讓它在無光的環境下自然風乾，最後使用液態氮折斷。使用切層厚度 $4\mu\text{m}$ 、曝光時間 400 毫秒的列印參數所印製之結構，經上述之清洗方法清洗後由 SEM 拍攝的結構頂部圖，如圖 5.41(a)所示；局部放大圖如圖 5.41(b)所示，結構頂部一樣可以看出結構輪廓及空孔，表面結構受到丙酮侵蝕而產生破損現象。從金相顯微鏡拍攝之斷面來看，如圖 5.42(a)，表面有六角形結構形狀；但從 SEM 拍攝之斷面圖，如圖 5.42(b)所示，斷面已完全固化成實心結構，故可推論以光學方式所拍攝之六角形輪廓，為斷面表層因為成化效



果較好而凸起之結構輪廓，空孔中雖然有過度成化但因為對焦的關係導致金相顯微鏡可以拍出六角圖形。

從上述發生的現象可得到小結，使用丙酮作為清洗的溶劑會使結構表面受到侵蝕，對樹酯溶解性好，但實驗中測試過許多組，對結構內部的通透並無改善，照片整理於附錄中之附圖 25、附圖 26，可以說明結構內部之過度成化現象是在列印曝光時產生，而不是因為殘留的樹酯固化。

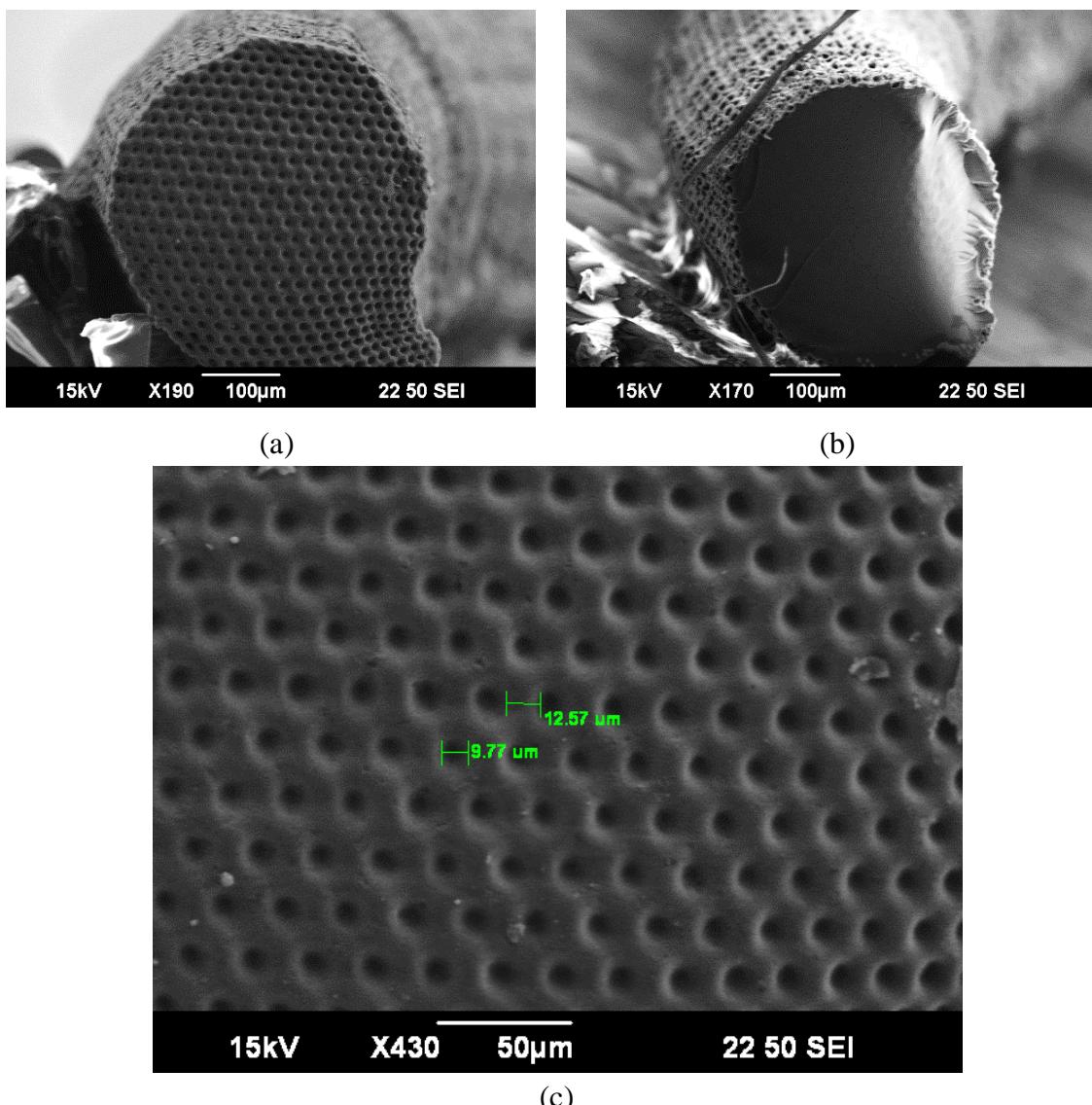


圖 5.39 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 350 毫秒列印之結構(a)頂部(b)在液態氮中折斷之斷面(c)頂部局部放大圖

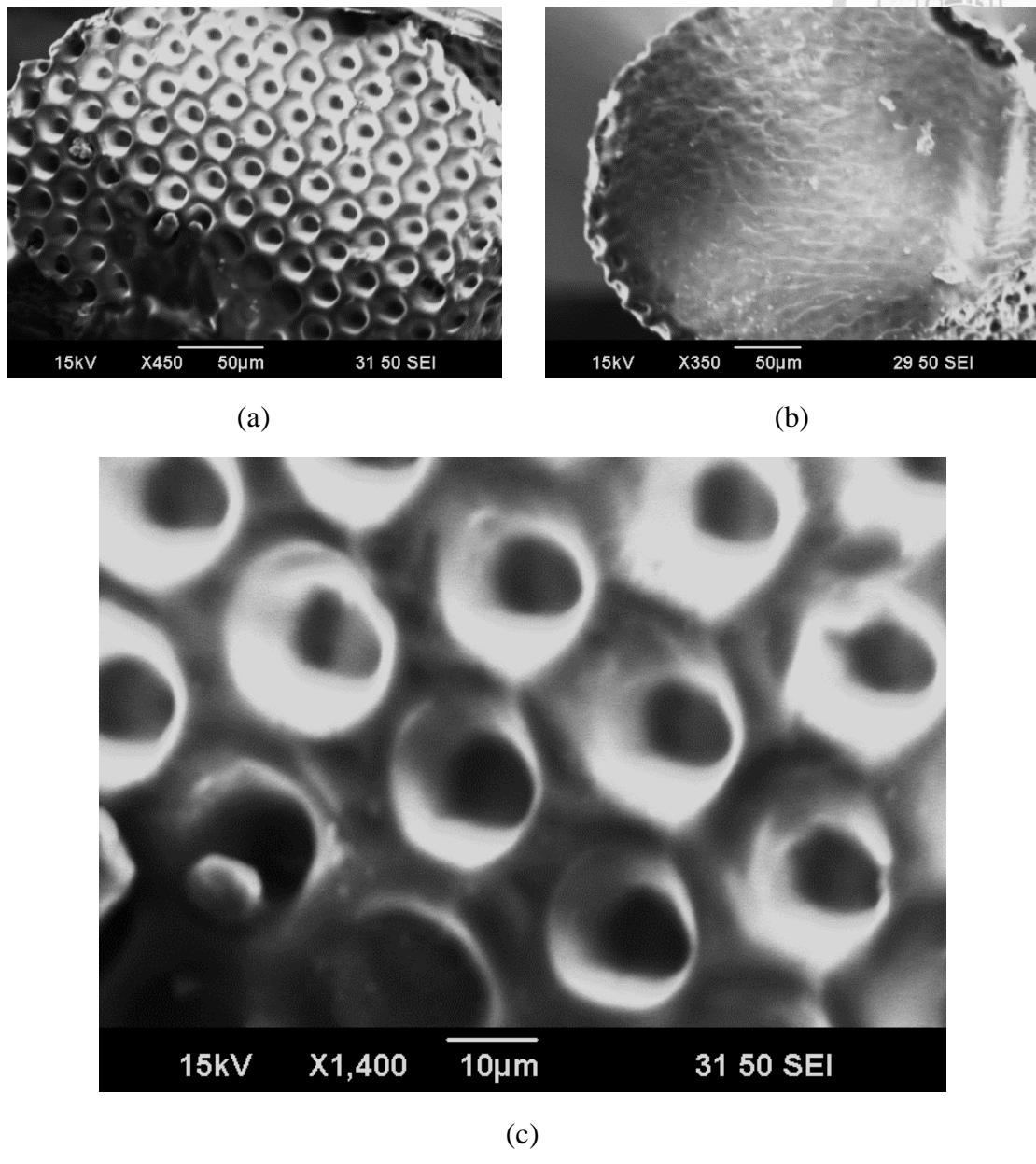
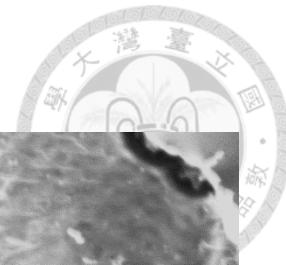


圖 5.40 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構(a)頂部(b)在液態氮中折斷之斷面(c)頂部局部放大圖

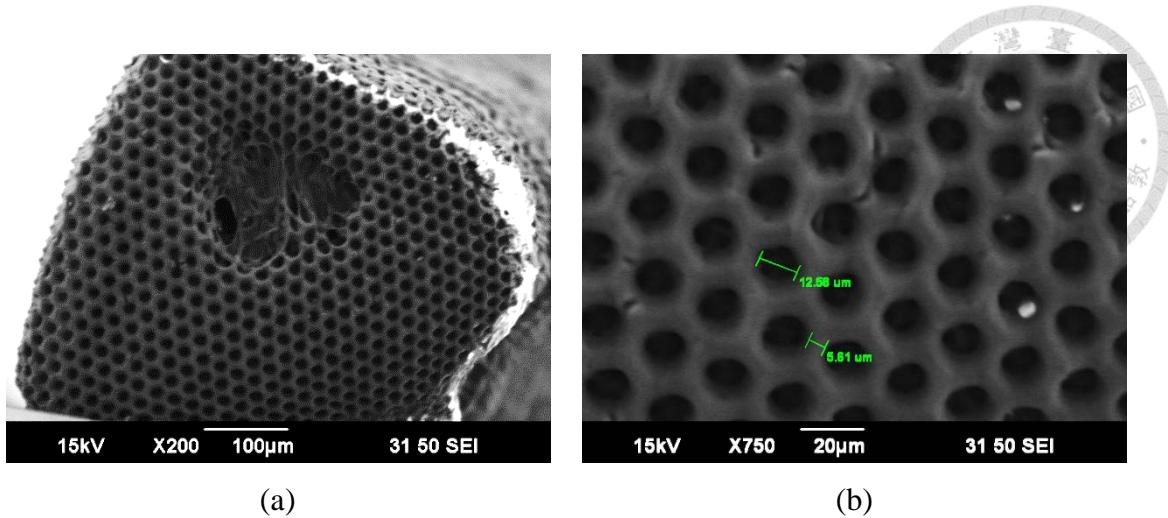


圖 5.41 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構，靜置在丙酮中三天後使用超音波震盪機震盪 5 分鐘，使用 SEM 拍攝(a)頂部(b)局部放大圖

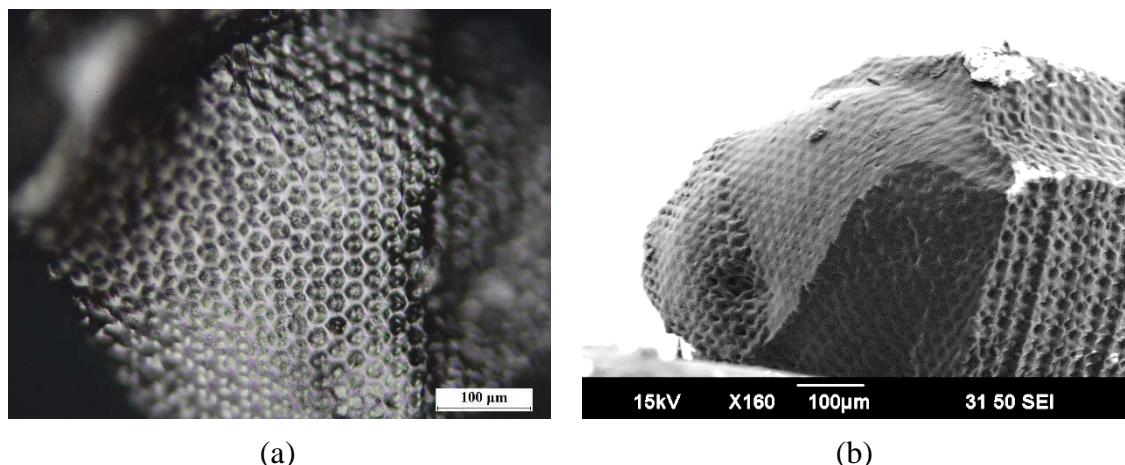


圖 5.42 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構，靜置在丙酮中三天後使用超音波震盪機震盪 5 分鐘 (a)使用金相顯微鏡 (b)使用 SEM 拍攝之折斷面

從上述實驗中得知 DB9 無法成功印製出設計尺寸 20-4-20 之通透結構，故嘗試再把蘇丹含量提高使用 DB10 來印製，在切層厚度 4μm、底層曝光時間 3000 毫秒的列印參數下，將曝光時間從 400 毫秒逐漸提高到 2000 毫秒，經多次測試後皆無法成功印出結構，推測是因為蘇丹含量太高而導致曝光後無法成化成型。嘗試降低切層厚度至 3μm，底層曝光時間 3000 毫秒，曝光時間提高到 2000 毫秒以上也無法印出結構。



5.2.9 小結

從結構-20 的結果中可以得知，蘇丹的含量從 DB9 的 0.4g 到 DB10 的 0.45g 增加了 0.05g，在同樣切層厚度下，DB10 的曝光時間提高至 DB9 的曝光時間五倍以上，都無法成功列印出此尺寸之結構。相較於先前印製結構-30 時，欲改善結構內部不通透的問題，蘇丹的含量從 DB7 的 0.3g 到 DB8 的 0.35g 也增加了 0.05g，使用相同的曝光時間就能成功印出結構而且通透。實驗中使用 DB10 經多次參數調整及列印皆無法成功印出結構，因此 DB9 為本實驗架設之機台目前能成功印製結構的最後配方，結構-20 在此配方下尚未成功印製出通透結構，故結構-20 為目前測試中所做過的最小尺寸，而結構-30 為目前能印製通透結構之最小尺寸。

5.3 試片印製

5.3.1 試片尺寸設定

5.2 節在做結構通透測試時，因為繪製模型時沒有統一結構的編排型式及結構單層的長寬高比，在接下來要做的機械性質測試中，需要將試片的規格統一後才能去做比較與分析。因此重新定義試片之範圍大小，依據先前列印的經驗，可以穩定成功印製的投影光場面積大小約為 $0.75 \times 0.75\text{mm}^2$ ，因此試片之長度與寬度設定為 0.75mm，如圖 5.43 所示，在此範圍內依不同尺寸之六角形將其填滿並交互堆疊；試片整體高度設定為 8mm。

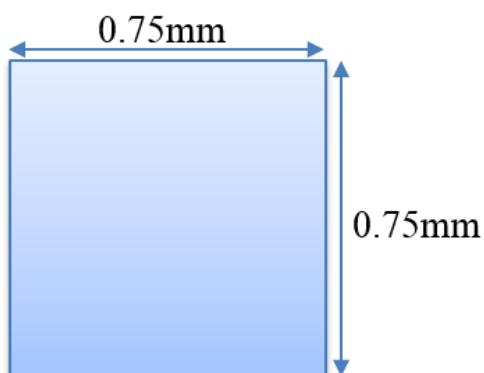


圖 5.43 試片長寬設定



5.3.2 試片參數設定

試片在印製時主要有幾項參數可供調整設定，分為樹酯配方、曝光時間、結構尺寸、二次處理，在做機械性質測試時可依據不同參數來作比較分析。其中結構尺寸可分為整體尺寸大小與結構單層之長寬高比；二次處理分為使用 UV 光進行二次固化與使用恆溫恆濕箱加熱，比較 UV 光的曝光時間對結構之影響與加熱至不同溫度對結構之影響。

根據先前通透測試之結果，樹酯配方 DB5 可成功印出設計尺寸邊長為 150μm、120μm、100μm、80μm 之結構，曝光時間 600~800 毫秒皆可成功印出結構；樹酯配方 DB7 可成功印出設計尺寸邊長為 50μm、40μm 之結構，曝光時間 500~700 毫秒皆可成功印出結構；樹酯配方 DB8 可印出設計尺寸邊長為 30μm 之結構，曝光時間 400~500 毫秒可成功印出結構。結構之長寬高比設定為 10:1:10，選用結構-80 去做二次處理之影響比較，實驗參數設定及規劃如表 5.1 所示。

表 5.1 實驗參數設定

	樹酯	試片尺寸	曝光時間(毫秒)	二次處理
1	DB5	150-15-150	600-800	
2	DB5	120-12-120	600-800	
3	DB5	100-10-100	600-800	
4	DB5	80-8-80	600-800	
5	DB5	80-8-80	600	UV
6	DB5	80-8-80	600	加熱
7	DB7	50-5-50	500-700	
8	DB7	40-4-40	500-700	
9	DB8	30-3-30	500-900	



5.3.3 試片印製成果

- 150-15-150

試片-150 使用 DB5 印製，曝光時間 600 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.44 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層(c)為 SEM 拍攝結構頂部(d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。

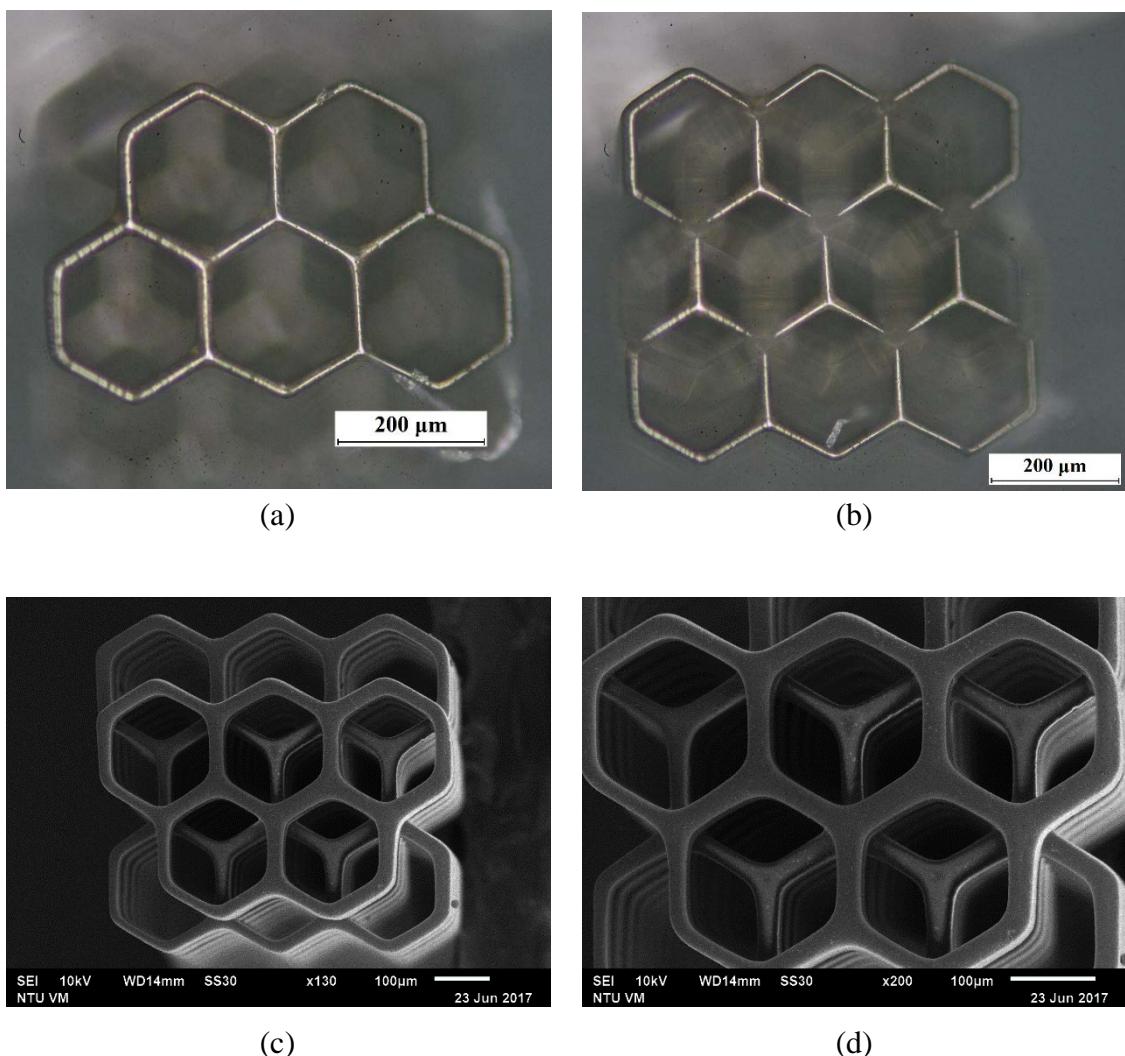


圖 5.44 試片-150/DB5/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖



- 120-12-120

試片-120 使用 DB5 印製，曝光時間 600 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.45 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層 (c)為 SEM 拍攝結構頂部 (d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。

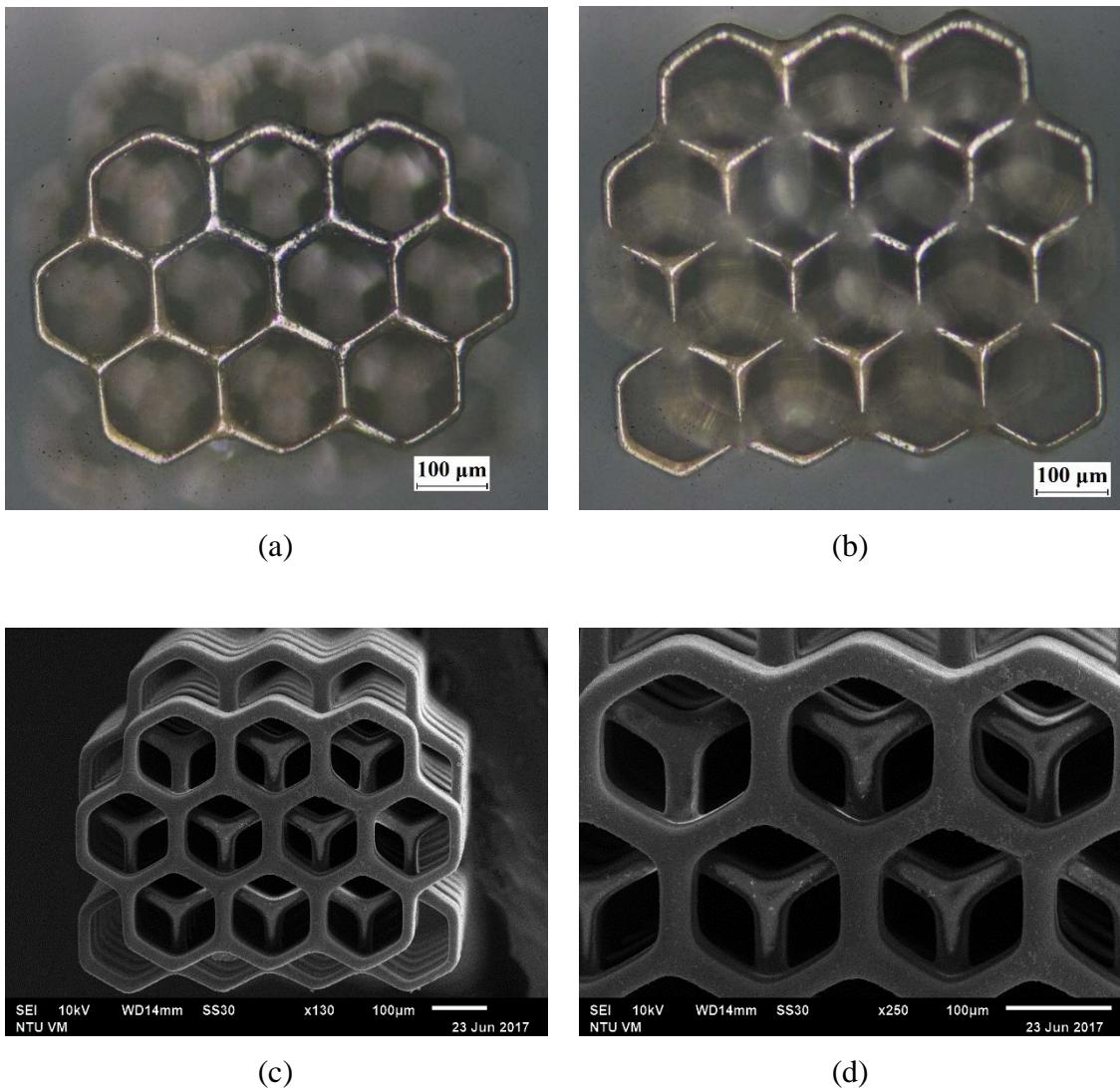
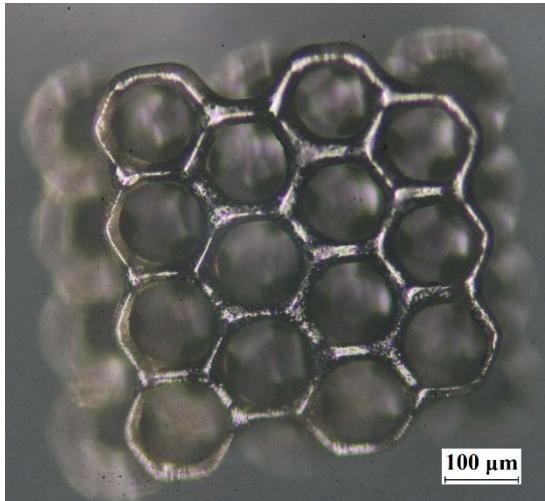


圖 5.45 試片-120/DB5/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖

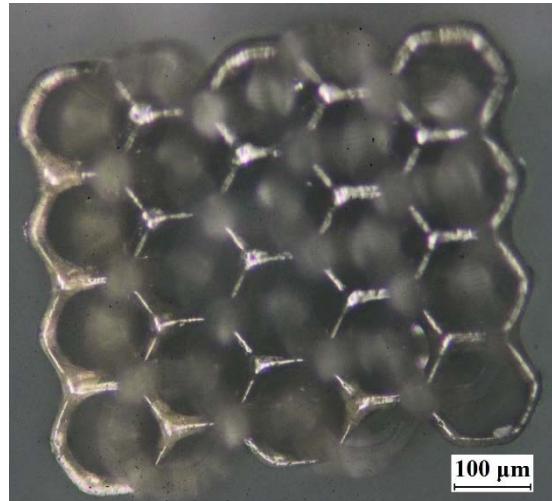


- 100-10-100

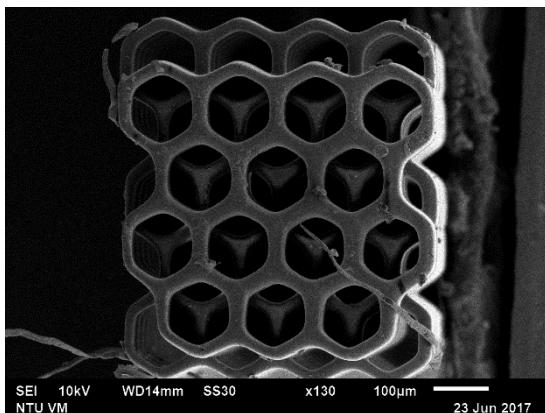
試片-100 使用 DB5 印製，曝光時間 600 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.46 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層(c)為 SEM 拍攝結構頂部(d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。



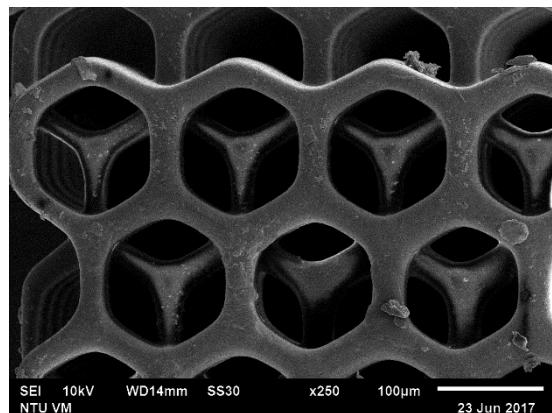
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5.46 試片-100/DB5/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖



● 80-8-80

試片-80 使用 DB5 印製，曝光時間 600 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.47 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層(c)為 SEM 拍攝結構頂部(d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。

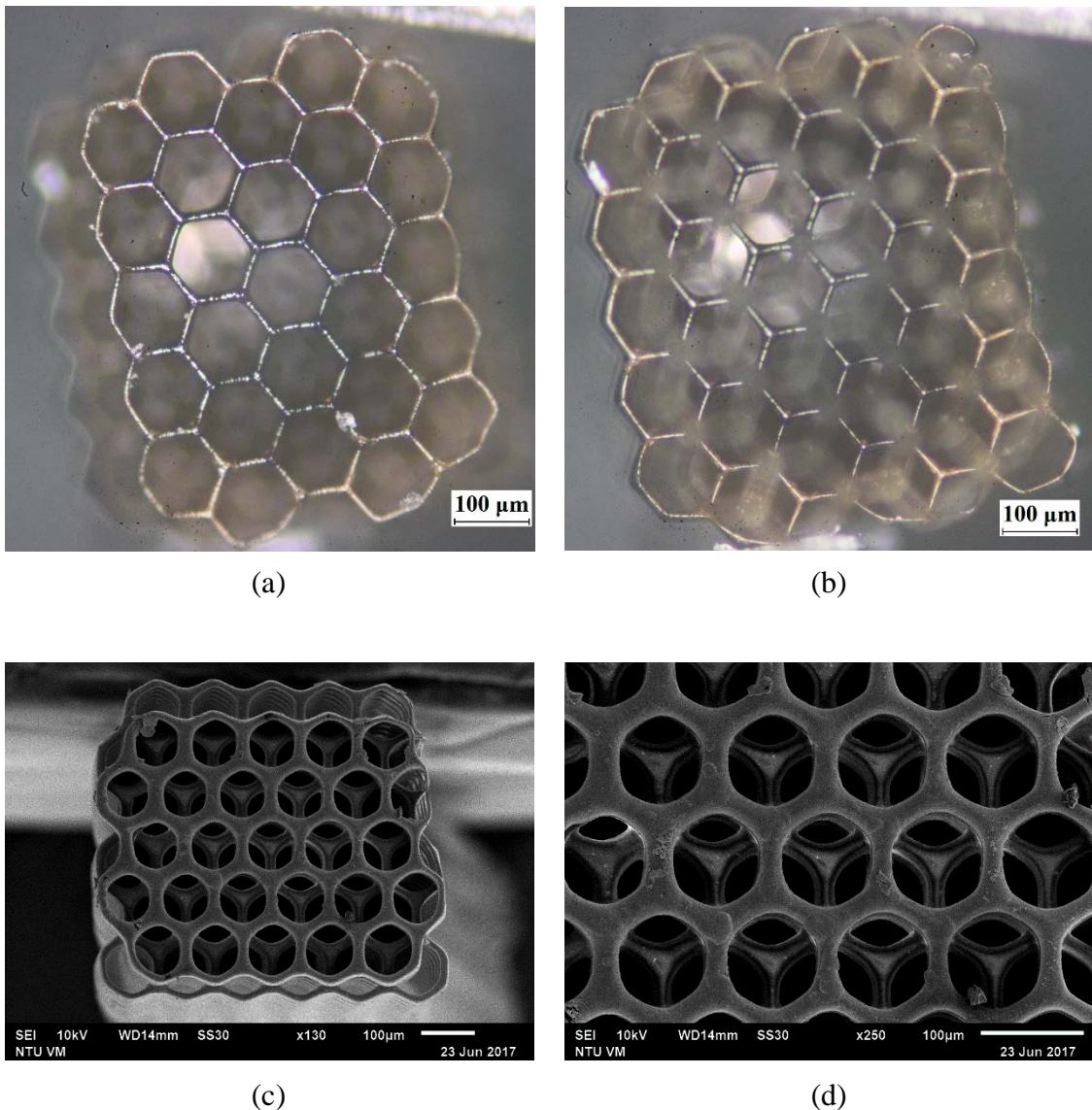


圖 5.47 試片-80/DB5/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 600 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖



● 50-5-50

試片-50 使用 DB7 印製，曝光時間 500 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.48 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層(c)為 SEM 拍攝結構頂部(d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。從照片可以看到試片邊緣處因為光場較弱，有部分結構印不出來，試片不具完整性。

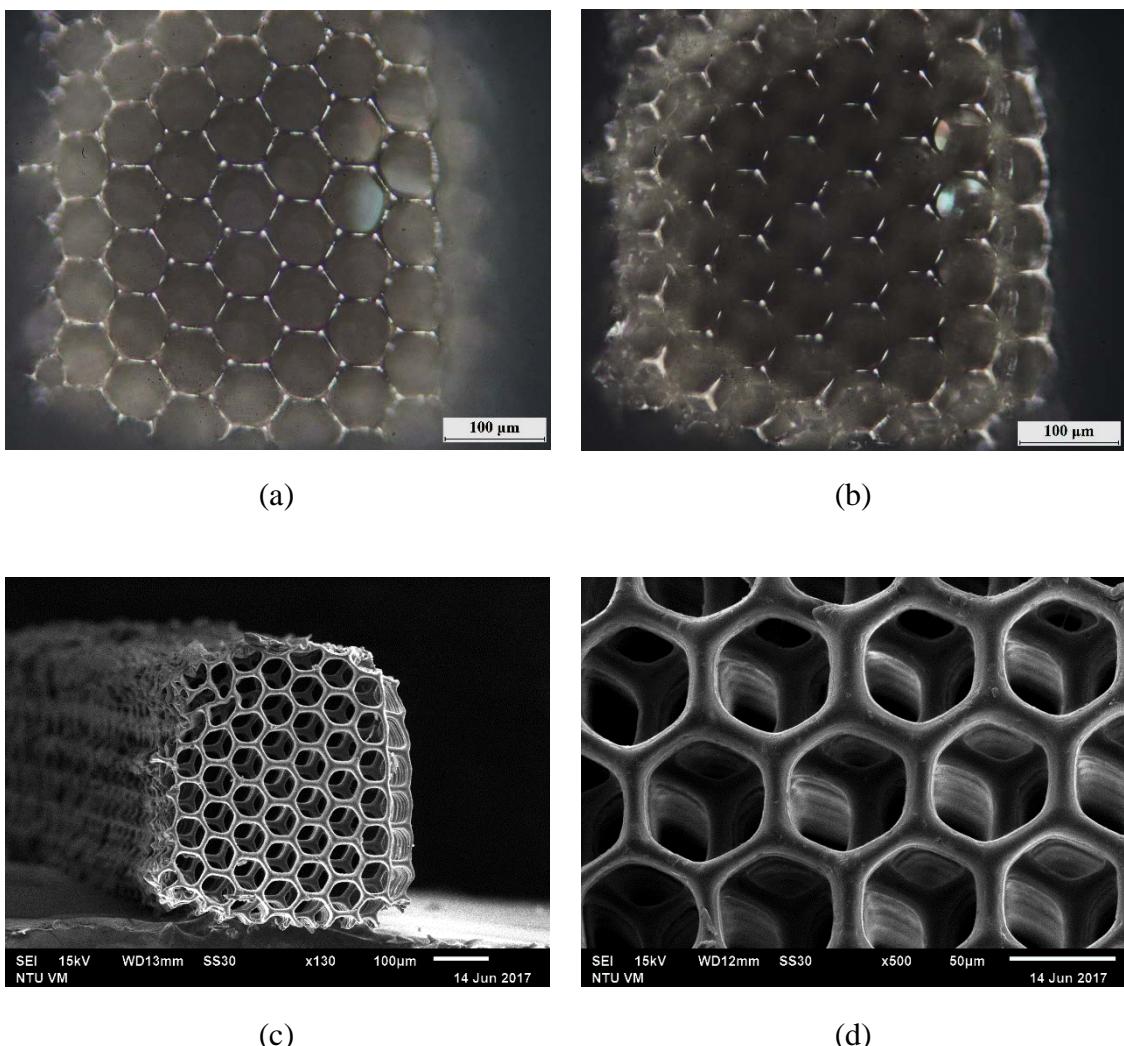


圖 5.48 試片-50/DB7/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 500 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖



● 40-4-40

試片-40 使用 DB7 印製，曝光時間 500 毫秒、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，試片分別使用金相顯微鏡及 SEM 拍攝，如圖 5.49 所示，(a)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第一層 (b)為金相顯微鏡拍攝結構頂部第二層(c)為 SEM 拍攝結構頂部(d)為 SEM 拍攝結構頂部之局部放大圖。從照片可以看到試片-40 與試片-50 有相同的狀況，結構邊緣印不出來，試片不具有完整性。

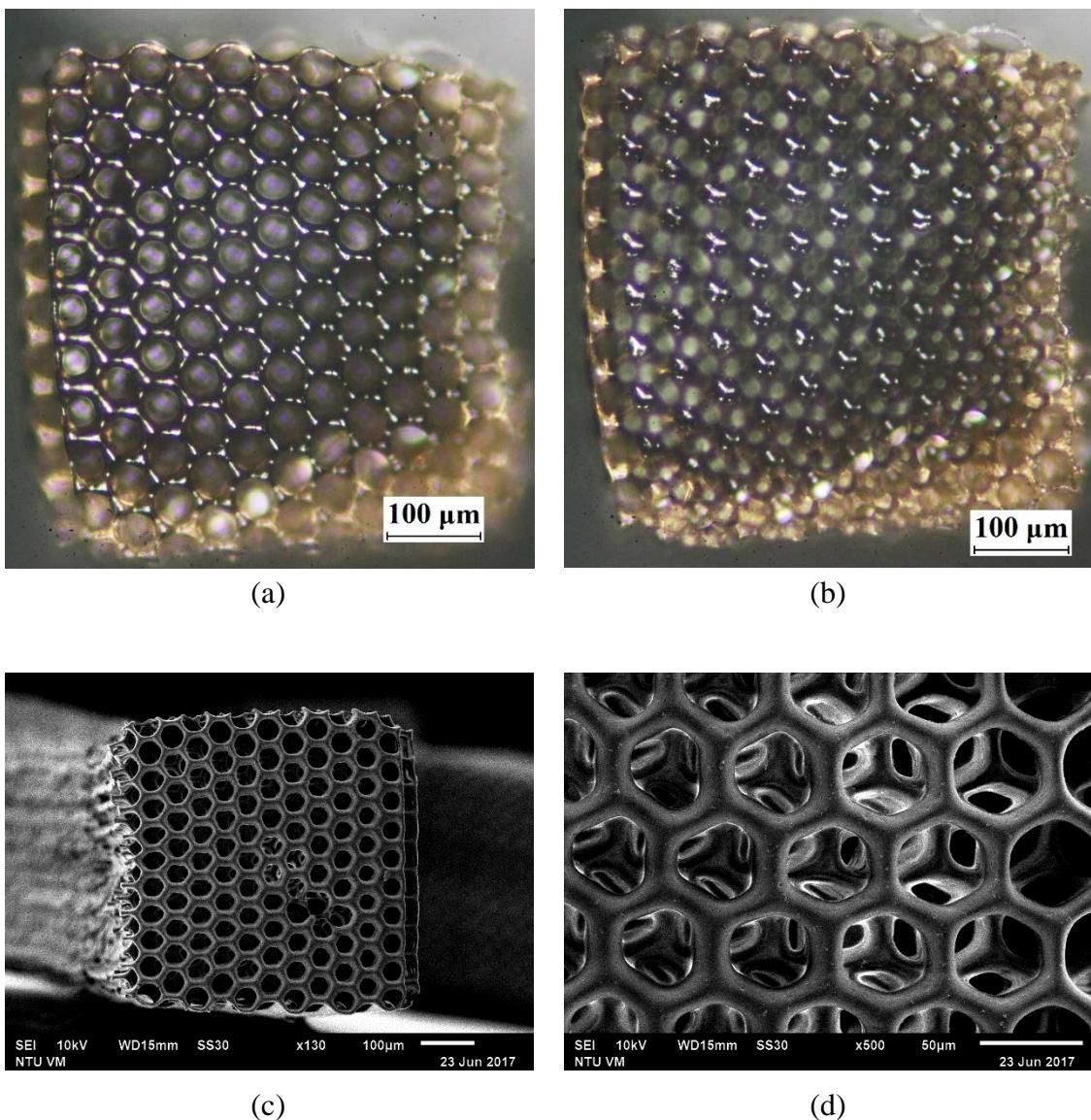
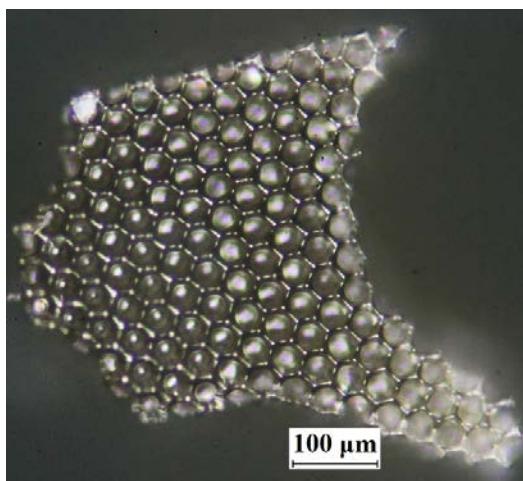


圖 5.49 試片-40/DB7/層厚 $5\mu\text{m}$ /曝光時間 500 毫秒(a)金相顯微鏡拍攝試片頂部第一層(b)金相顯微鏡拍攝試片頂部第二層(c)SEM 拍攝試片頂部(d)SEM 拍攝試片局部放大圖

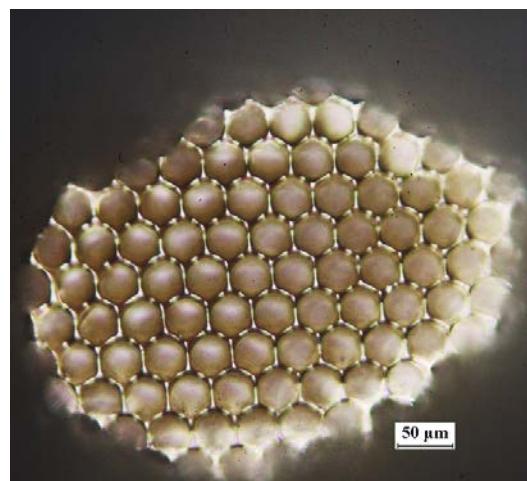


- 30-3-30

印製試片 -30 時，經過多次測試皆無法成功印出完整試片，僅有部分結構能印出，外側光場較弱處則無法成功印出結構，如圖 5.50 所示，故此尺寸之試片無法做進一步的機械性質測試。



(a)



(b)

圖 5.50 試片 -30/DB8/層厚 5 μm ，金相顯微鏡拍攝試片頂部(a)曝光時間 900 毫秒
(b) 曝光時間 700 毫秒

5.4 三點彎曲測試

試片在正式測試前，為確保試片在進行三點彎曲時不會滑落，經過多組測試後發現，試片在受力後所能接受的最大變形量約為 1.8mm，若超過此變形量試片兩端支點處會有滑動的現象。當變形量超過 2mm 以上時，試片與兩端支點脫離，故偵測到的力量已無參考價值。因為 1.8mm 約為試片滑動的臨界值，為使量測到的數據有參考價值，避免試片在進行彎曲測試時滑動脫落，實驗時使用之最大變形量為 1.5mm。

5.4.1 試片一致性測試

試片在相同參數下印製後，進行機械性質測試，並比較試片的一致性，若試片在同樣參數下列印之試片具有一致性，即可調整其他列印參數並比較參數調整對試片之影響。



5.4.2.1 試片 80-80

試片-80 使用 DB6、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，分別在曝光時間 600、700、800 毫秒印製，
同樣曝光時間印製五組試片，進行三點彎曲測試後比較其一致性。

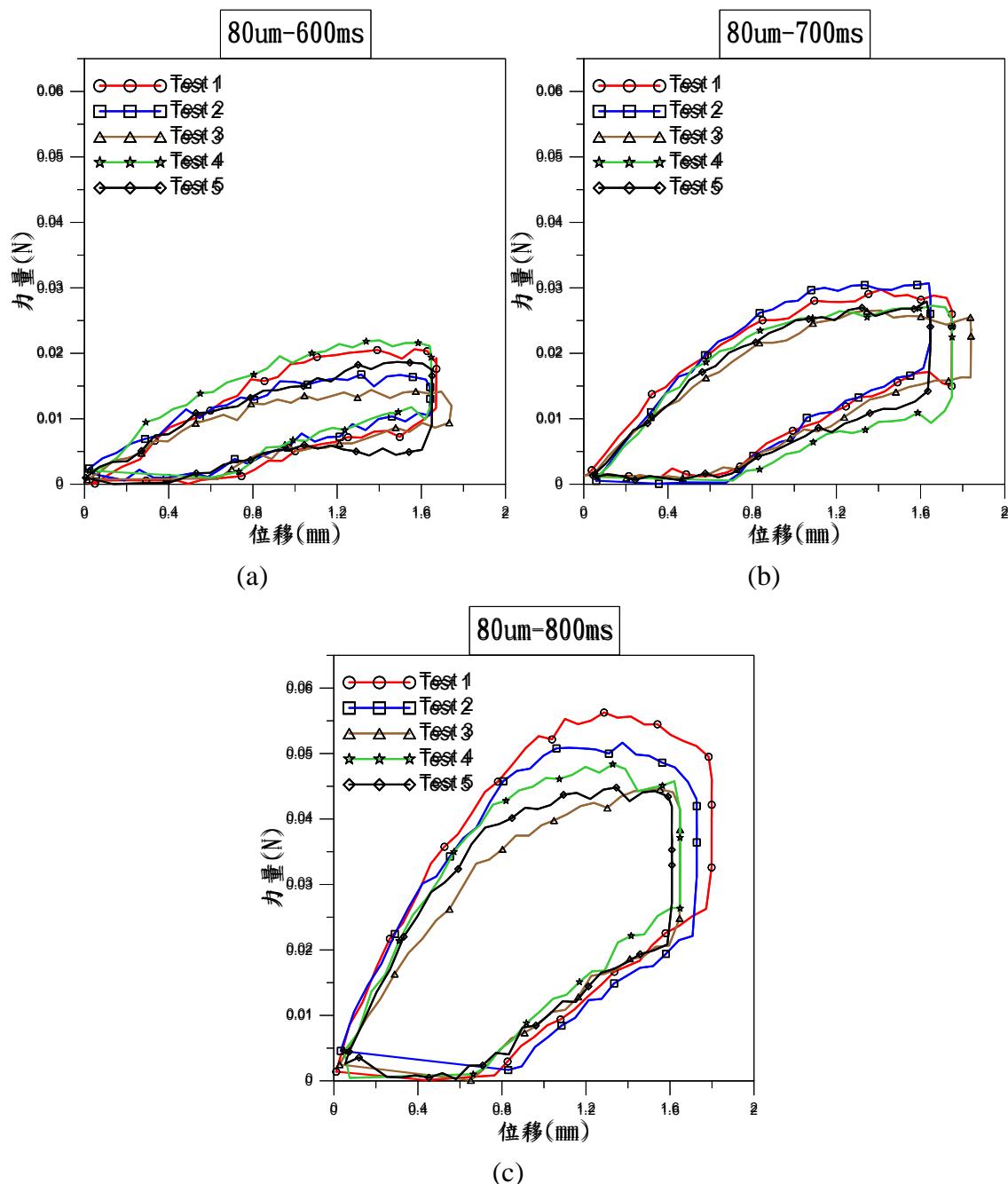


圖 5.51 試片-80 曝光時間 600-800 毫秒之一致性測試



5.4.2.2 試片 150-15-150

試片-150 使用 DB6、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，分別在曝光時間 600、700、800 毫秒印製，同樣曝光時間印製五組試片，進行三點彎曲測試比較其一致性。

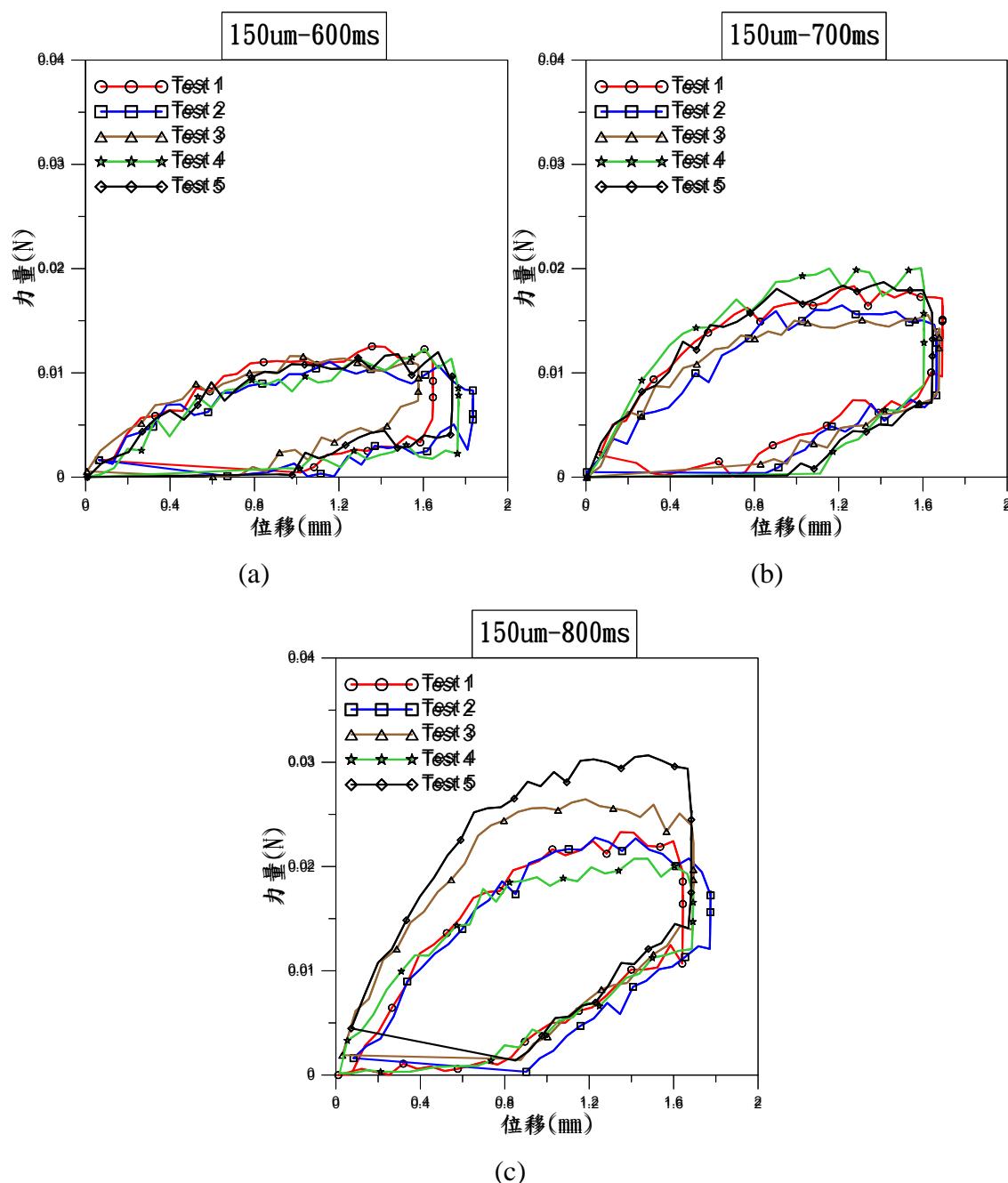
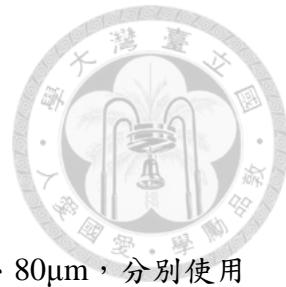


圖 5.52 試片-150 曝光時間 600-800 毫秒之一致性測試



5.4.2 列印參數影響測試

5.4.2.1 曝光時間之影響

樹酯 DB5、切層厚度 5 μm ，試片 150 μm 、120 μm 、100 μm 、80 μm ，分別使用曝光時間 600、700、800 毫秒來印製，並比較在同樣尺寸下曝光時間對其機械性質之影響。曝光時間提高其結構剛性相對增加，推測是因為樹酯受到曝光時間的增加使成化更完全，或是有過度成化的現象導致結構線寬變粗，剛性因而增加。

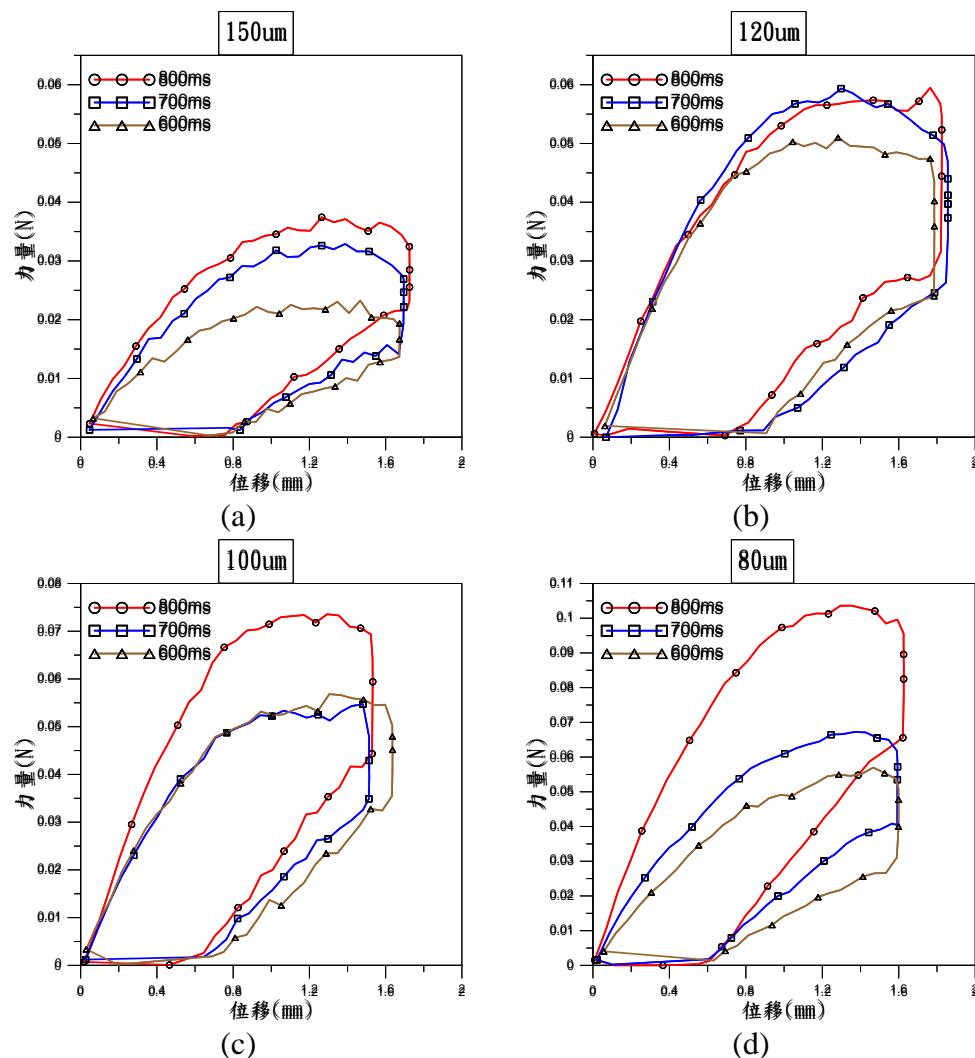


圖 5.53 (a)結構-150(b)結構-120(c)結構-100(d)結構-80 曝光時間 600ms-800ms 之機械性質比較



5.4.2.2 結構尺寸之影響

樹酯 DB5、切層厚度 $5\mu\text{m}$ ，相同曝光時間下比較不同尺寸結構對機械性質之影響，如圖 5.54 所示。相同列印參數下，結構尺寸越大其剛性較差，曝光時間 800 毫秒有較為明顯的趨勢，如圖 5.54(c)所示。

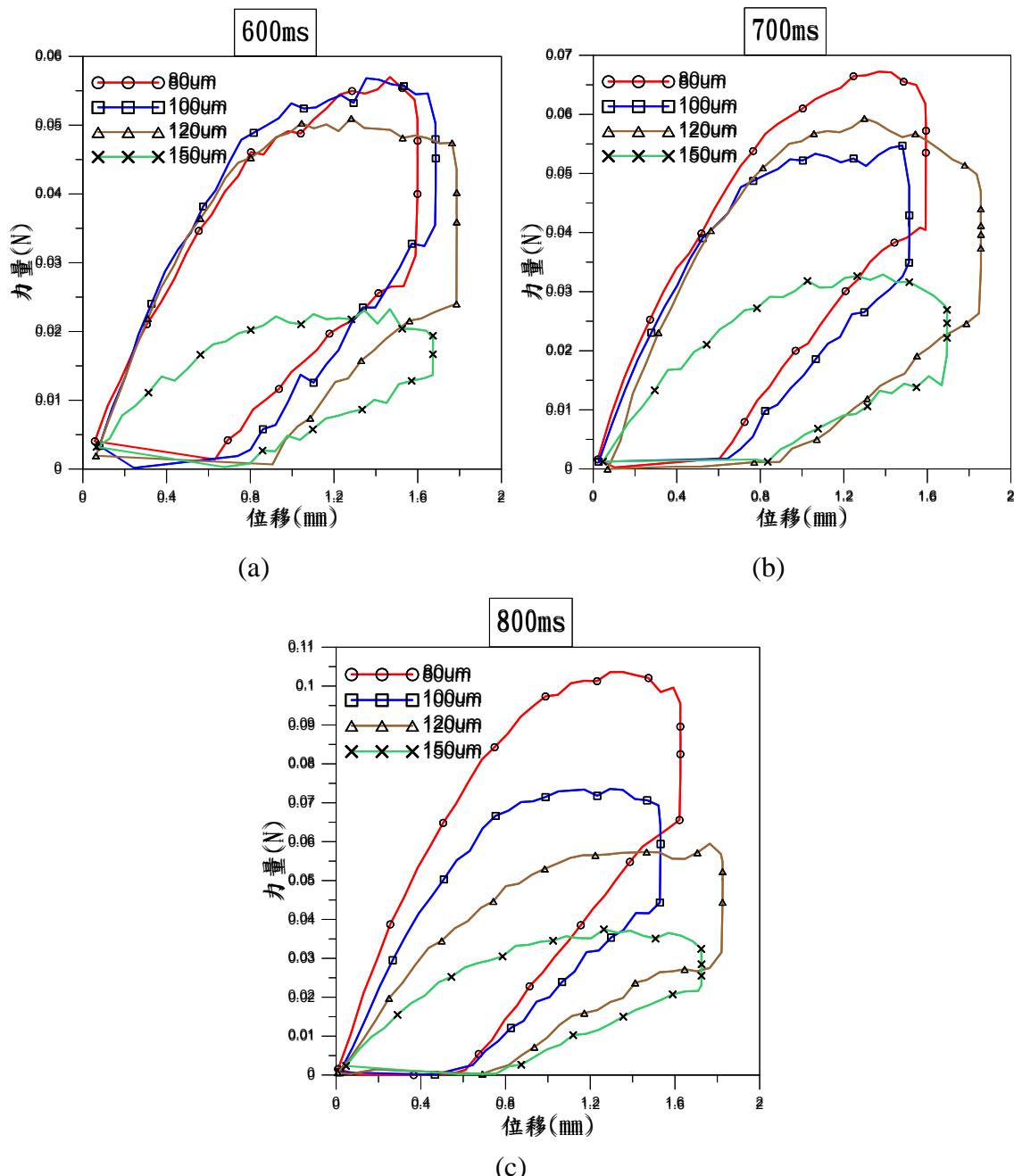


圖 5.54 曝光時間(a)600ms(b)700ms(c)800ms 印製不同尺寸結構之機械性質比較



5.4.2.3 Post cure(溫度之影響)

選用結構-80 做為測試之試片，使用 DB5、切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間 600 毫秒印製三組試片，印完使用酒精清洗，待試片完全乾燥後放置在恆溫恆濕箱中加熱，分別在 50°C 、 70°C 、 90°C 加熱五分鐘後取出，並對試片做三點彎曲測試。如圖 5.55 所示，在 50°C 、 70°C 中加熱五分鐘後之結構剛性與未加熱之結構剛性差異不大，但是當溫度提高到 90°C ，加熱後結構之剛性下降許多，可以得知當熱處理的溫度高到一定程度後會破壞結構並降低結構之剛性與強度。

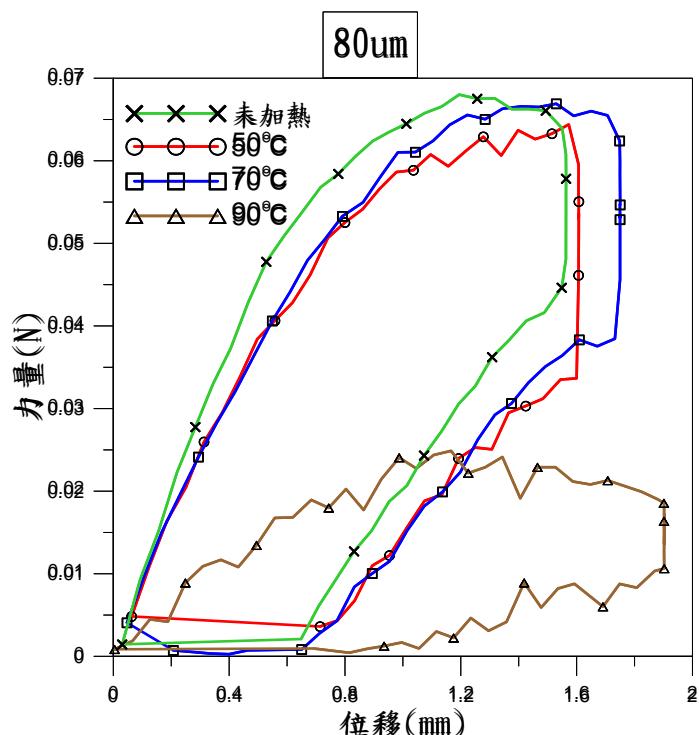


圖 5.55 在不同溫度下加熱後對結構之影響



5.4.2.4 Post cure (照射 UV 光之影響)

選用結構-80 做為測試之試片，使用 DB5、切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間 600 毫秒印製兩組試片，印完使用酒精清洗，待試片完全乾燥後使用 UV 光分別照射 1 小時及 2 小時，進行三點彎曲測試後做進一步的比較，如圖 5.56 所示，與未照射 UV 光之試片相比，照射 1 小時之試片其剛性沒有太大的差異，但當照射提高至 2 小時候試片剛性有略微下降的趨勢。整體而言對結構之機械性質沒有太大的影響，原本使用 UV 光照射是為了使試片能二次固化，使結構中原本成化不完全的部分能完全成化，若結構本身有成化不完全的現象，使用 UV 光照射後之試片其結構剛性應該會有提高的現象，但從結果中得知，不僅沒有提高，反而因為照射時間提高而略有下降的趨勢，因此推論發生此現象有兩種可能性，其一是因為試片已經完全成化，故使用 UV 光照射試片並沒有任何影響；另一種可能性是因為 UV 光之穿透能力有限，僅有結構表面幾層能受到照射，對結構整體之機械性質影響不大。

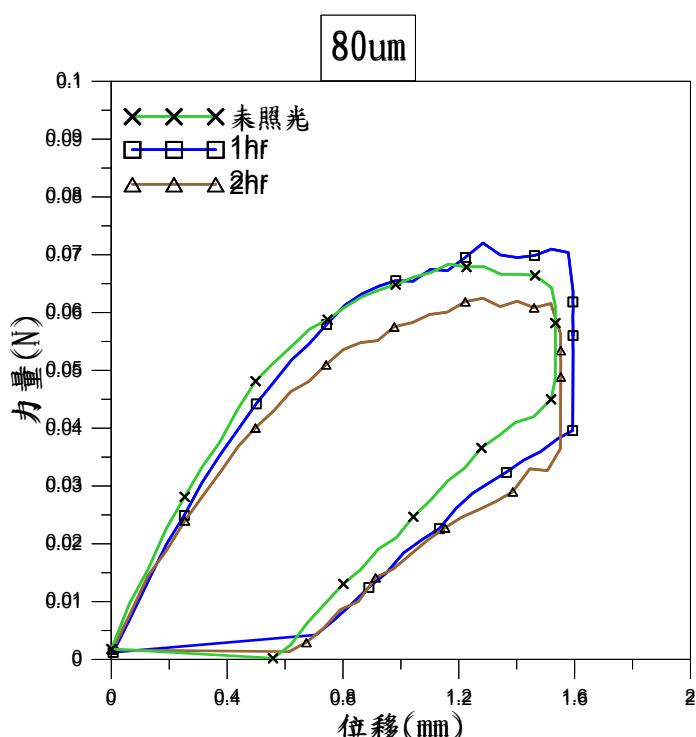


圖 5.56 試片印製完後使用 UV 光分別照射 1、2 小時進行二次固化處理



5.4.2.5 試片恢復測試

試片在做完三點彎曲測試後，會慢慢恢復成原本的型態，在此將針對此現象做進一步的測試與探討。選用試片-80，實驗中對同組試片重複進行三次三點彎曲測試，如圖 5.57、圖 5.58 所示，測試完之試片約等待 3~4 秒完全恢復後即進行下一次測試，從圖中可以看到同一組試片分別進行三次彎曲測試後，其力量與位移之關係曲線皆相似，沒有發生結構鋼性下降的趨勢，從結果可以推論試片在位移量 1.5mm 的受力變形下，並沒有破壞內部結構，也沒有對結構造成永久變形。

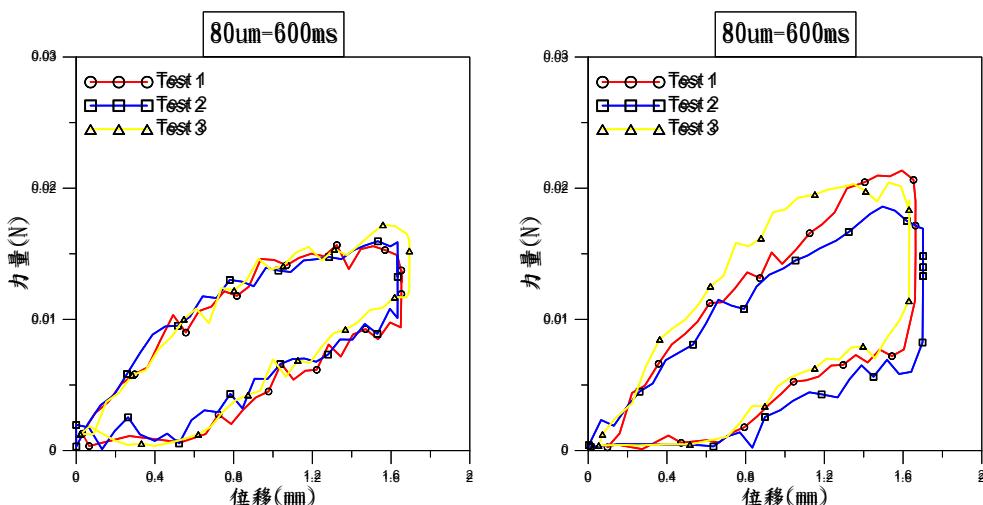


圖 5.57 試片-80/DB6/曝光時間 600 毫秒 試片恢復測試

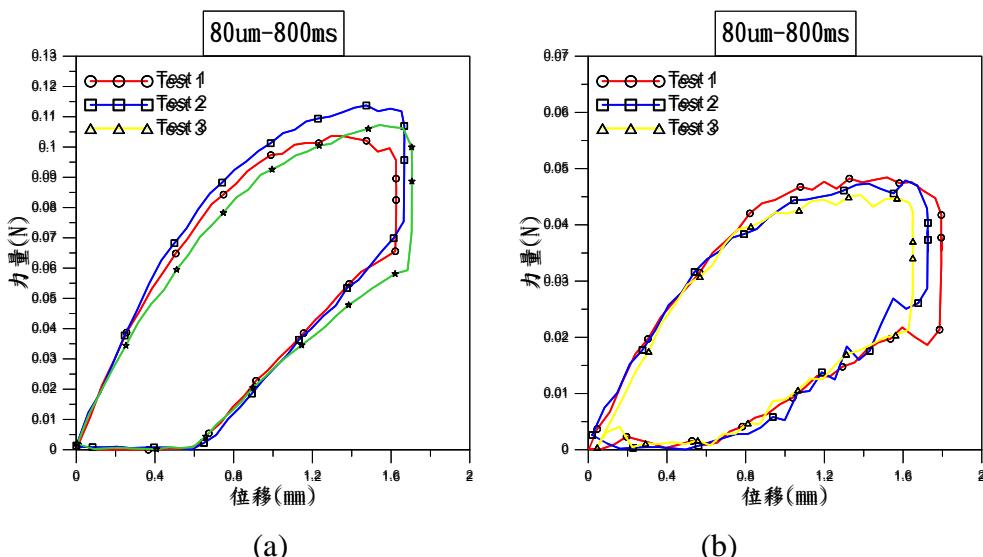


圖 5.58 試片-80/曝光時間 800 毫秒(a)DB5 (b)DB6 試片恢復測試



5.4.2.6 試片加載至不同位置後卸載

實驗中發現，當試片加載至某負載後靜止期間，力量會隨時間下降，在此分別將試片加載至不同位置後卸載。試片選用結構-80，列印參數為 DB6、切層厚度 $5\mu\text{m}$ 、曝光時間 800 毫秒。分別測試加載後靜止 1-2 秒卸載，如圖 5.59 所示，可以發現試片加載至不同位置後卸載皆有力量掉下來的現象發生；加載後靜止 10 秒再卸載，如圖 5.60 所示，大約靜止 7~8 秒鐘後力量就已經趨向穩定而不再下降，直到 10 秒後卸載力量才繼續下降。

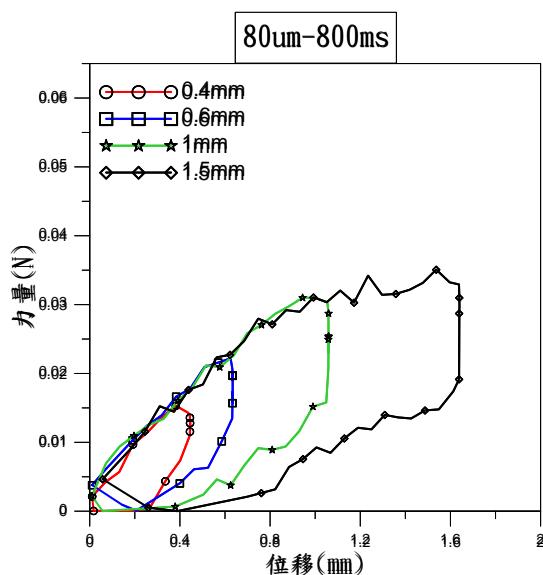


圖 5.59 力量加載至不同位置停 1-2 秒後卸載

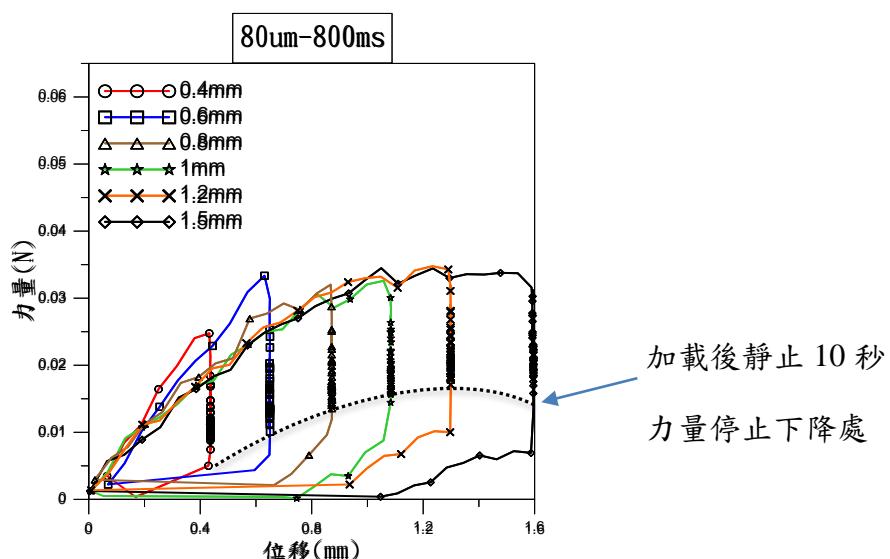


圖 5.60 力量加載至不同位置停 10 秒後卸載



5.4.3 小結

使用 DB6 印製試片-80 之一致性測試中，不同曝光時間印製的五組試片在變形量 1.5mm 處所量測到的力量區間不同，600 毫秒的力量區間為 0.01-0.02N、700 毫秒的力量的區間為 0.02-0.03N、800 毫秒的力量區間為 0.04-0.055N，可看出不同曝光時間的差異性，從圖中也可以看出試片大致上具有一致性。

同樣的，使用 DB6 印製試片-150 之一致性測試中，不同曝光時間印製的五組試片在變形量 1.5mm 處所量測到的力量區間不同，600 毫秒的力量區間為 0.008-0.01N、700 毫秒的力量的區間為 0.015-0.02N、800 毫秒的力量區間為 0.02-0.03N，也可以看出不同曝光時間的差異性，從圖中也可以看出試片大致上具有一致性。

同一尺寸之試片，其他參數不變的情況下，整體而言曝光時間的提高會增加其剛性，推測是因為曝光時間增加使結構線寬變粗，故導致剛性提升。

在相同曝光時間下，結構之長寬高比同為 10:1:10，結構尺寸越小其剛性越高，曝光時間 800 毫秒有較為明顯的趨勢。

試片印完後所進行的二次處理中，溫度對試片的機械性質影響較大，在 90°C 的恆溫恆濕箱中放置五分鐘後，其結構剛性及強度大幅下降，推測是樹酯在高溫的環境下材料本身會產生破壞。使用 UV 光照射對試片之影響不大，推測是因為 UV 光穿透能力不足以照射進結構內部，或是結構本身在曝光固化時就已經完全成化。

試片彎折後之恢復速度快，測試完後等待約 3~4 秒鐘再做彎曲測試，其力與位移之曲線不變，同時也說明了 1.5mm 的彎曲變形量不會使結構受到破壞。



第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本研究使用 DLP 光固化技術，將投影機鏡頭改裝並搭配一顆十倍平場顯微物鏡，藉由調整物鏡與鏡頭之間的距離，即可將投影畫面從鏡頭改裝後的 $4.3 \times 2.42 \text{ mm}^2$ 縮小至 $1.454 \times 0.810 \text{ mm}^2$ ，最小理論解析度從 $2.2(\mu\text{m}/\text{pixel})$ 縮小至 $0.75(\mu\text{m}/\text{pixel})$ ，但因為本實驗使用的筆記型電腦螢幕最高解析度不足，故最小理論解析度只能達到 $1.064(\mu\text{m}/\text{pixel})$ 。相較於一些自行改裝的文獻，

因為投影畫面縮小導致對焦不易，在此開發的 CCD 對焦系統，此系統可準確的將投影面對焦在移動平台的玻片上，解決了對焦不易的問題。將來若要把投影面積縮得更小，只需調整 CCD 與物鏡之間的距離或更換較高倍率的物鏡即可。

此系統目前可成功印製的六角型結構中，可通透之最小尺寸邊長為 $23\mu\text{m}$ ，測試階段中無法通透之最小尺寸邊長為 $15.46\mu\text{m}$ 。測試過程中為了印製更小的結構而提高蘇丹的含量，當 80ml 的 DB 中蘇丹含量超過 0.3g ，容易因為初始液面太厚而導致底層無法成化，往上堆疊的結構薄膜會因為沒有基座而漂走，故需要提高底層曝光時間或是加印底座。當尺寸推進至極限時，發現只是提高蘇丹含量及調整曝光時間無法同時解決水平方向及深度方向之過度成化問題，實驗中持續提高蘇丹含量至 0.45g 時， 4 像素寬之結構-20 會因為投影亮度不足而無法成化，蘇丹含量 0.4g 之配方也無法印出通透結構，故設計尺寸 $20\text{-}4\text{-}20$ 為此系統通透測試中能印製的最小極限。

三點彎曲測試中，結構之剛性會隨著曝光時間的增加而提高，推測是因為曝光時間的提高導致線寬因為過度成化而變粗，故整體結構強度也會提升。相同的列印參數下，六角形單層結構尺寸邊長越小其整體試片的剛性與強度相對較高。



試片在做後處理時發現，經過 UV 紫外光燈照射後其結構剛性與強度並未明顯上升或下降，推測是因為 UV 光的穿透能力不足以影響結構內部，或是試片在印製時本身就已經完全成化。試片經高溫處理會改變其機械性質，當溫度達到 90°C 會破壞其結構內部，使試片之剛性與強度大幅下降。

試片在變形量 1.5mm 的測試後會在 3-4 秒內恢復原狀，反覆測試後其結構剛性與強度不會下降，力與位移之關係曲線也沒有太大的變化，故在測試時結構並無產生永久形變或破壞。

6.2 未來展望

實驗中所印製的結構太軟以至於在測試時能使用的 Load Cell 不太好找，未來可望在樹酯中添加奈米碳管或是其他用以強化的微小粉末材質，增加結構整體之剛性與強度，一方面便於儀器架設與測試，一方面隨著材料強度的提升，可以印製的微結構或微小元件就更多元化。在目前的三點彎曲測試中，僅能以量測到的力與位移關係曲線推測結構內部的變化，無法知道其內部實際受到的破壞或是實際變形情況，故可將樹酯加入導電性材料，藉由電阻值的變化判定結構受到破壞。

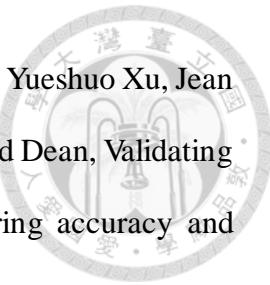


參考文獻

1. About Additive Manufacturing. Available from: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>.
2. 光固化成型法 . Available from: <http://lazybone1960.pixnet.net/blog/post/60855994-%E5%85%89%E5%9B%BA%E5%8C%96%E6%88%90%E5%BD%A2%E6%B3%95%EF%BC%88stereolithography%EF%BC%89.2014>.
3. 3D 列印技術比較：SLA 與 DLP. Available from: <https://3dmart.com.tw/news/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp>
4. 3D Printing Industry. Available from: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>
5. FDM 技術. Available from: http://www.3dprinting.com.tw/industries/fdm_technology.asp
6. 3D printing titanium and the bin of broken dreams. Available from: <http://pencerw.com/feed/2015/3/15/3d-printing-titanium-and-the-bin-of-broken-dreams>.
7. DREAMS Laboratory. Available from: http://www.me.vt.edu/dreams/material_jetting/
8. Laminated Object Manufacturing: LOM. Available from: <http://www.makepartsfast.com/laminate-object-manufacturing-lom/>
9. 從 DLP 技術之源談起，聊 DLP 投影技術的發展之道. Available from: <https://read01.com/G5ymkd.html>.
10. 蔡福森，DLP 投影機技術與產品動態. 1998.
11. 德州儀器亞洲區 DLP 事業部門. DLPTM 技術概要. 2003.
12. 劉俊廷，“以光固化 3D 列印技術製造阿基米德螺旋形微混合器之探討” 國立台灣大學工學院機械工程學系碩士論文, 2017.



13. 黃育嘉， “動態光罩式三維微影系統之研發” 國立台灣科技大學機械工程學系碩士學位論文,2004.
14. J. David Musgraves ,Maskless Projection Lithography,2003.
15. 王群智， “使用動態光罩微影技術於單層製作 3D 微小元件之研究” 國立台灣科技大學機械工程學系碩士學位論文,2005.
16. 蒲鑫達， “紫外光 DMD 無光罩微影系統之發展” 國立台灣科技大學機械工程學系碩士學位論文,2009.
17. 方偉凱， “無光罩微影系統之解析度研究” 國立台灣科技大學機械工程學系碩士學位論文,2010.
18. Dhanesh Kattiparambil Rajan, and Jukka Lekkala, A maskless exposure device for rapid photolithographic prototyping of sensor and microstructure layouts. 2010.
19. Bertsch,A., “ Rapid prototyping of small size objects ” ,Rapid Prototyping Journal.2000.
20. Stichel, T., Hecht, B., Houbertz, R., Sextl, G., “Two-Photon Polymerization as Method for the Fabrication of Large Scale iomedical Scaffold Applications”, Journal of Laser Micro/ Nanoengineering, Vol.5, pp.209-212,2010.
21. Danilevičius, Paulius; Rekštytė, Sima; Balčiūnas, Evaldas; Kraniauskas, Antanas; Širmenis, Raimondas; Baltriukienė, Daiva; Malinauskas, Mangirdas; Bukelskienė, Virginija; Gadonas, Roaldas; Sirvydis, Vytautas; Piskarskas, Algis., ” Direct Laser Fabrication of Polymeric Implants for Cardiovascular Surgery”, Materials Science / Medziagotyra, Vol. 18, No. 2, pp. 145-149,2012.
22. David Dean , Jonathan Wallace, Ali Siblani, Martha O. Wang, Kyobum Kim, Antonios G. Mikos, John P. Fisher, Continuous Digital Light Processing (cDLP): Highly Accurate Additive Manufacturing of Tissue Engineered Bone Scaffolds. 2012.
23. Jonathan Wallace, Martha O Wang, Paul Thompson, Mallory Busso, Vaijayantee



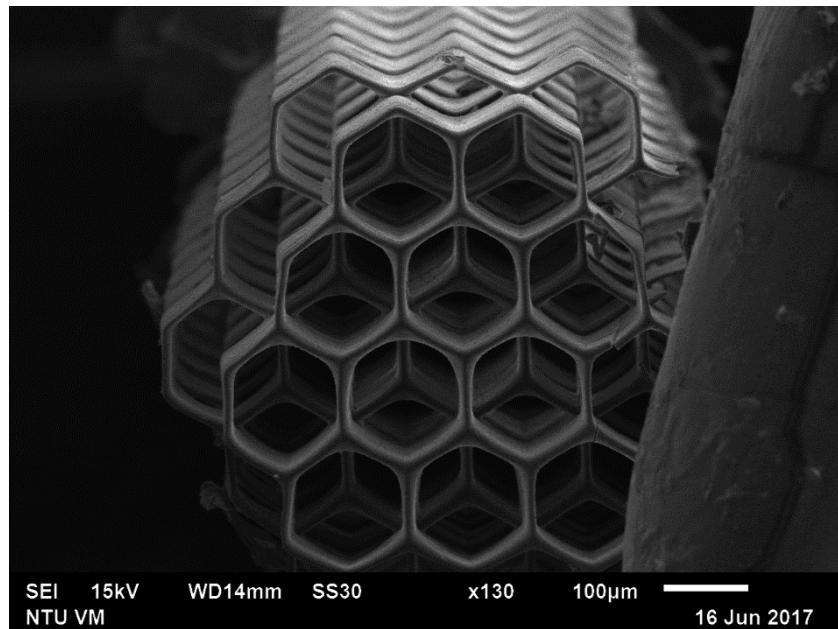
Belle, Nicole Mammoser, Kyobum Kim, John P Fisher, Ali Siblani, Yueshuo Xu, Jean F Welter, Donald P Lennon, Jiayang Sun, Arnold I Caplan and David Dean, Validating continuous digital light processing (cDLP) additive manufacturing accuracy and tissue engineering utility of a dye-initiator package .2014.

24. Eric J. Mott , Mallory Busso , Xinyi Luo , Courtney Dolder , Martha O.Wang, John P. Fisher, David Dean,Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly(propylenefumarate) scaffolds.2016.
25. PascalNelson , Geometric Optics for DLP .2013.
26. 影像感測器 (CCD 與 CMOS):<http://kcs.kcjh.ptc.edu.tw/~spt/computer/digital-image/CCD-CMOS.htm>
27. IDS Imaging Development Systems GmbH: <https://en.ids-imaging.com/home.html>
28. DONALD C. O'SHEA. Elements of Modern Optical Design.
29. Alasdair McAndrew, Inreoduction to Digital Image Processing with MATLAB(Asia Edition)

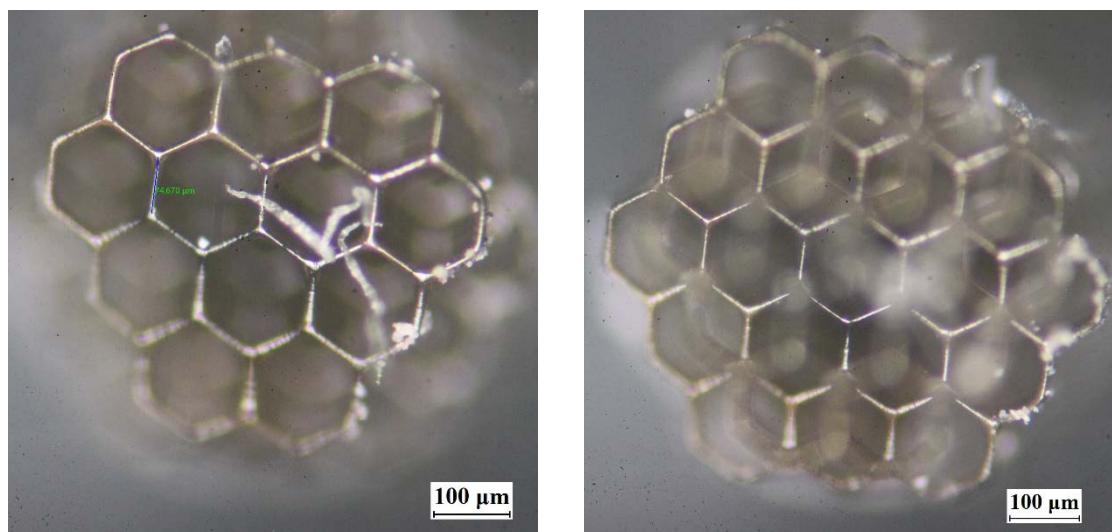


附錄

- 結構-100 通透測試

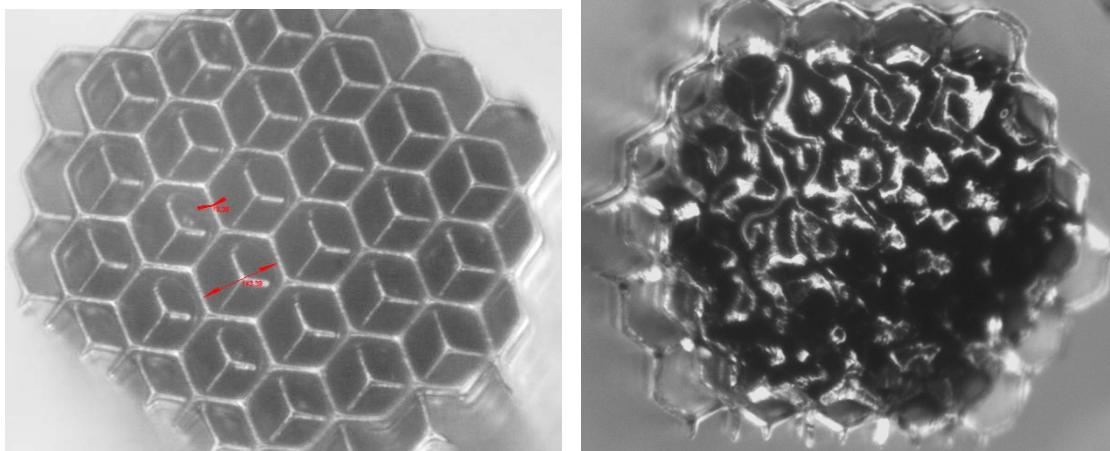


附圖 1 結構-100 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒 SEM 拍攝之結構頂部



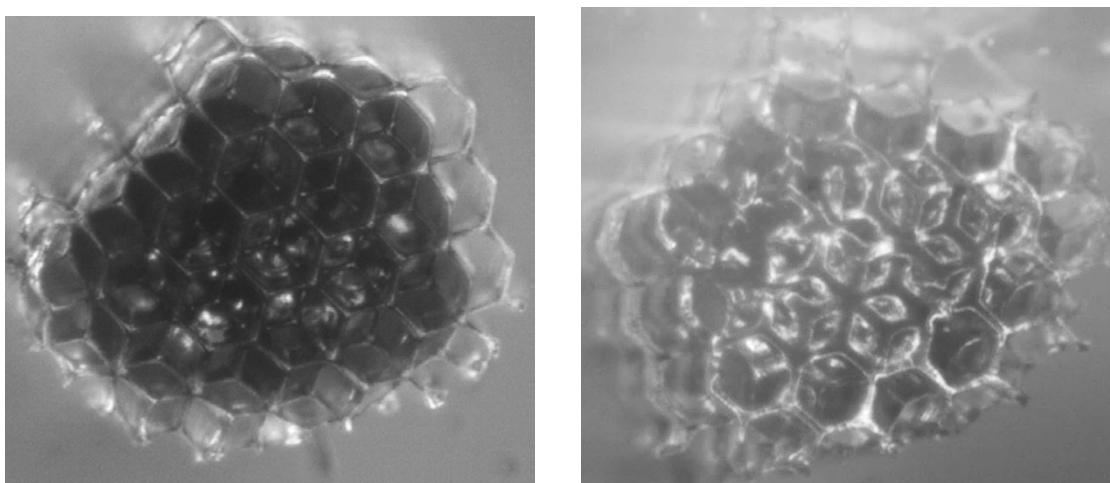
附圖 2 結構-100 樹酯 DB5、曝光時間 800 毫秒 金相顯微鏡拍攝之結構頂部

● 結構-100 通透測試



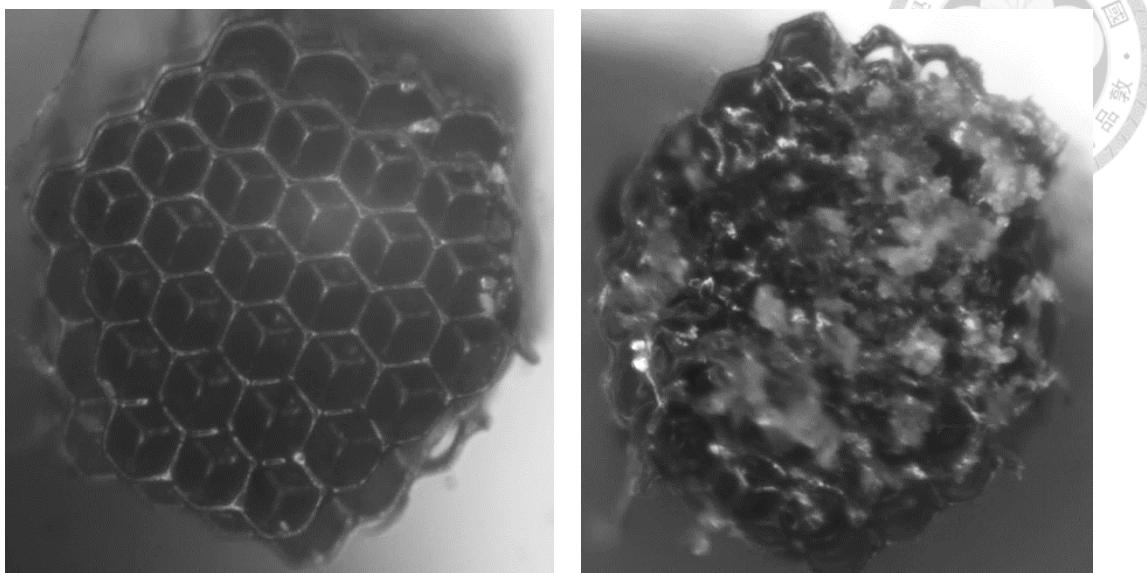
附圖 3 結構-100 樹酯 DB3 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖

● 結構-80 通透測試

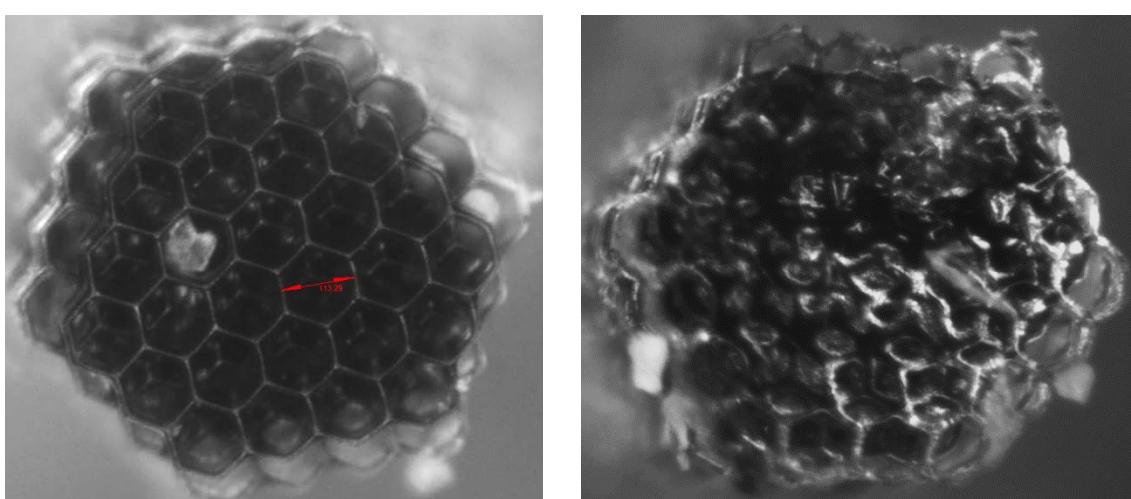


附圖 4 結構-80 樹酯 DB2 曝光時間 400 毫秒 頂部與斷面圖

● 結構-80 通透測試



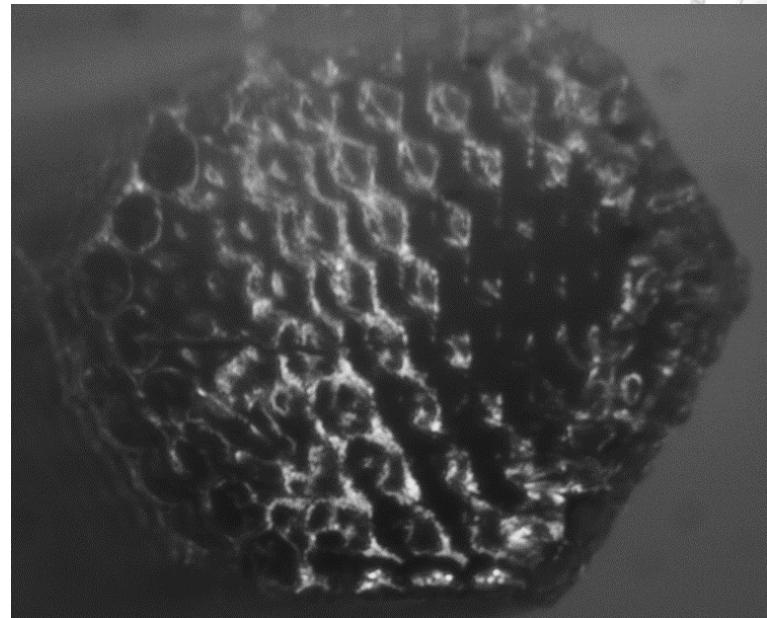
附圖 5 結構-80 樹酯 DB3 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖



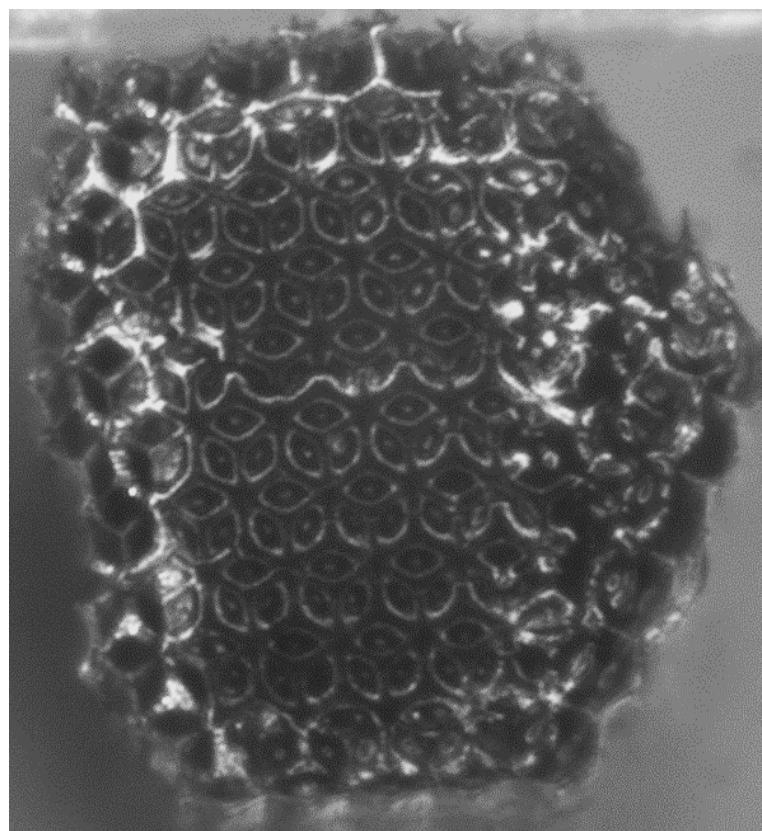
附圖 6 結構-80 樹酯 DB4 曝光時間 300 毫秒 頂部與斷面圖



● 結構-50 通透測試



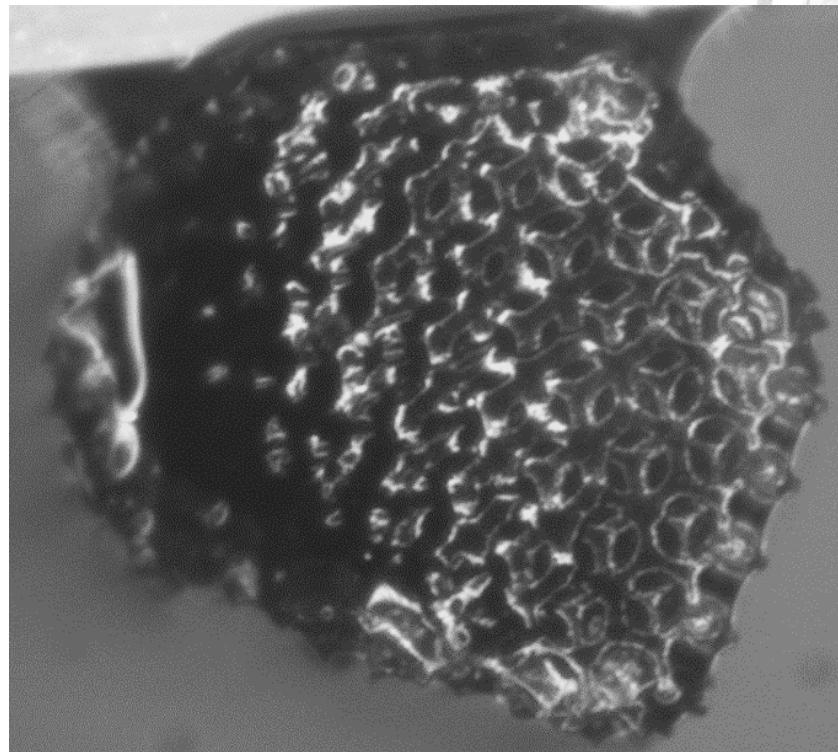
附圖 7 結構-50 樹酯 DB5 曝光時間 500 毫秒 斷面圖



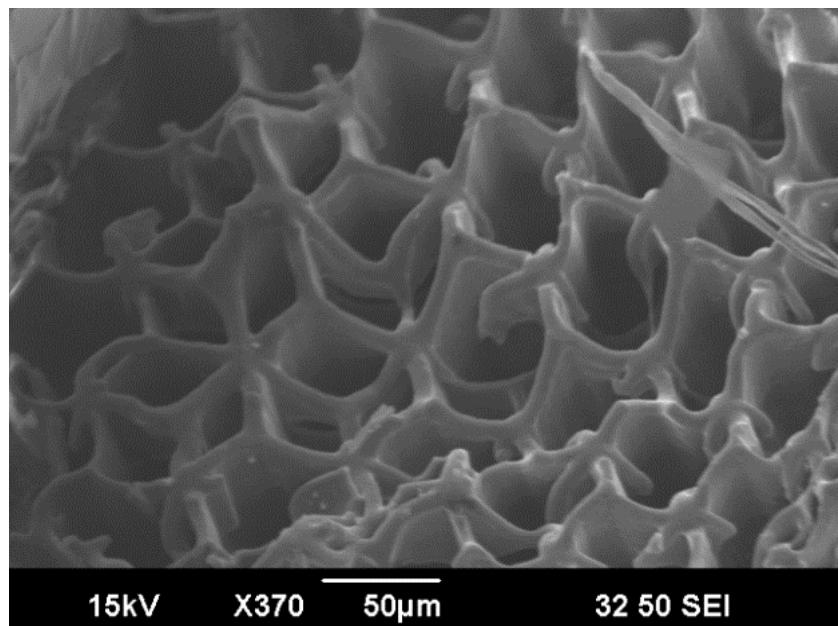
附圖 8 結構-50 樹酯 DB5 曝光時間 400 毫秒 斷面圖



● 結構-50 通透測試

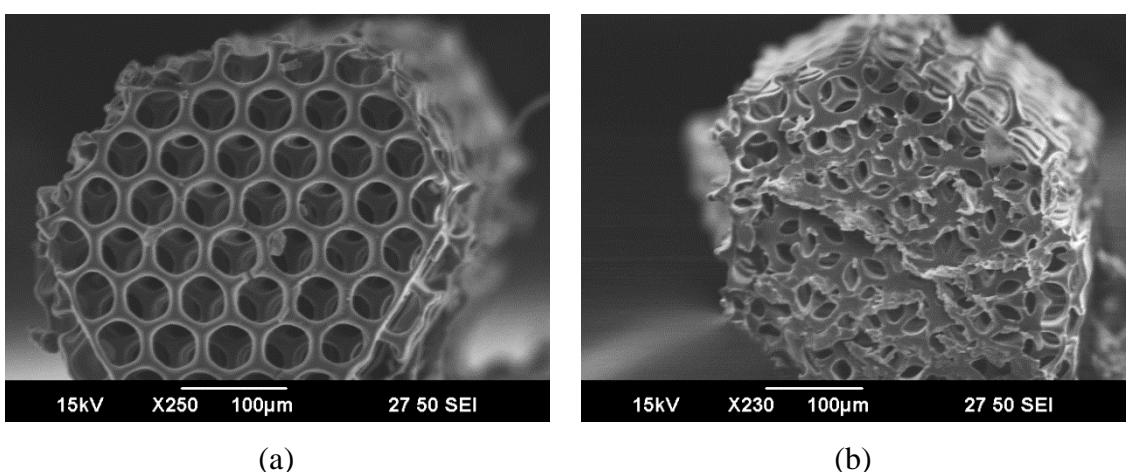
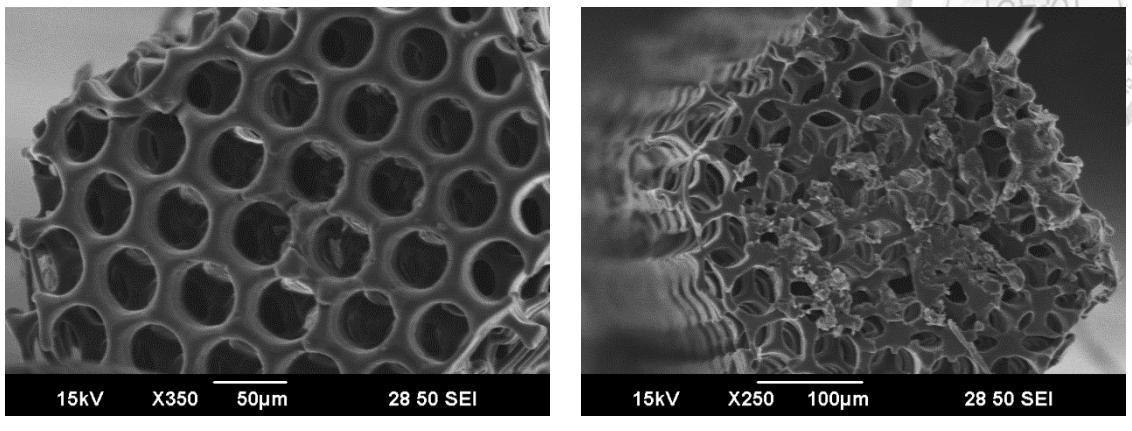


附圖 9 結構-50 樹酯 DB6 曝光時間 500 毫秒 斷面圖



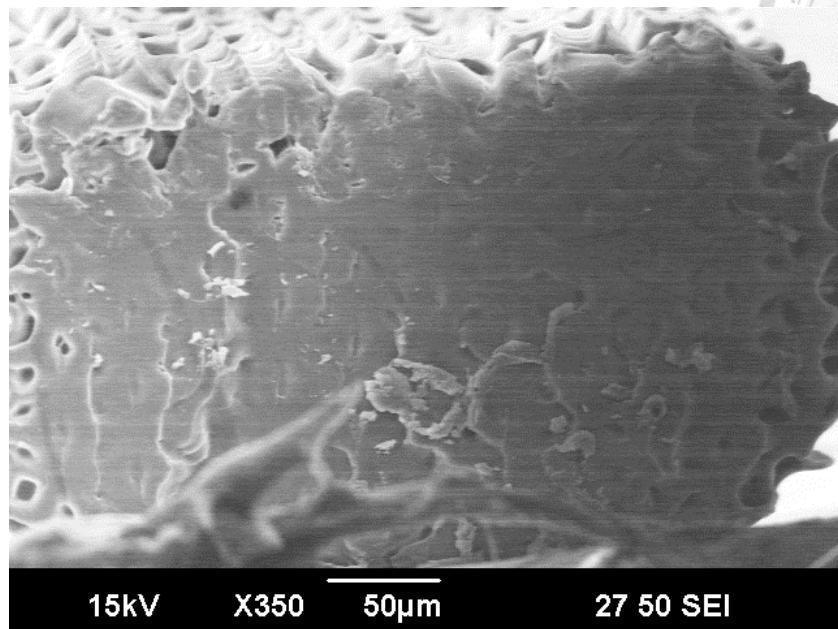
附圖 10 結構-50 樹酯 DB7 曝光時間 500 毫秒 斷面圖

● 結構-40 通透測試

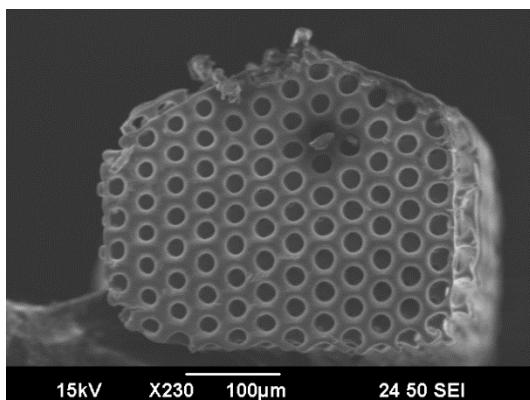




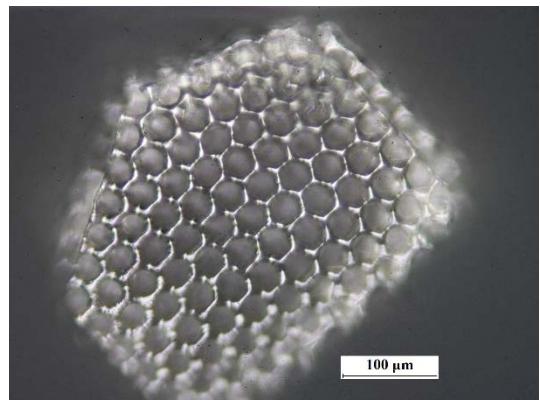
● 結構-30 通透性測試



附圖 13 結構-30 樹酯 DB7 曝光時間 500 毫秒 斷面圖



(a)

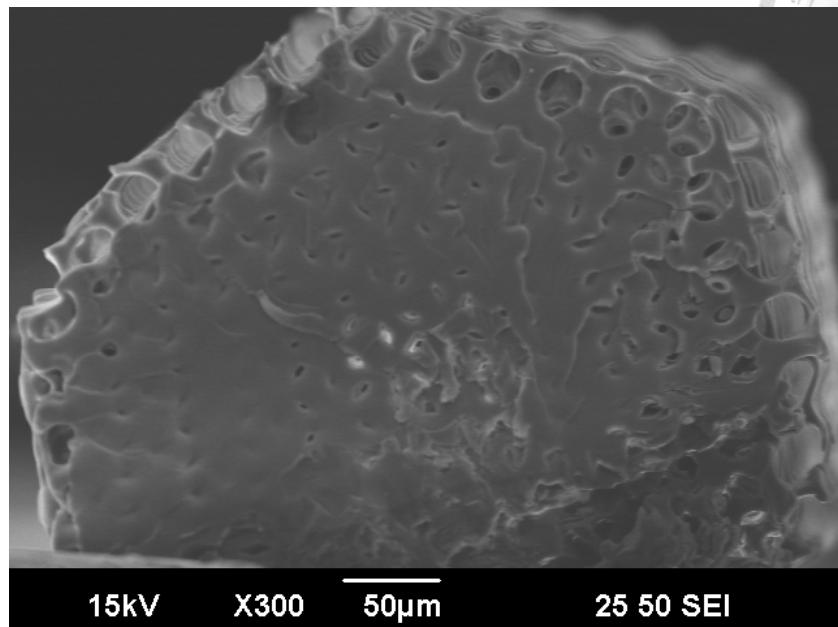


(b)

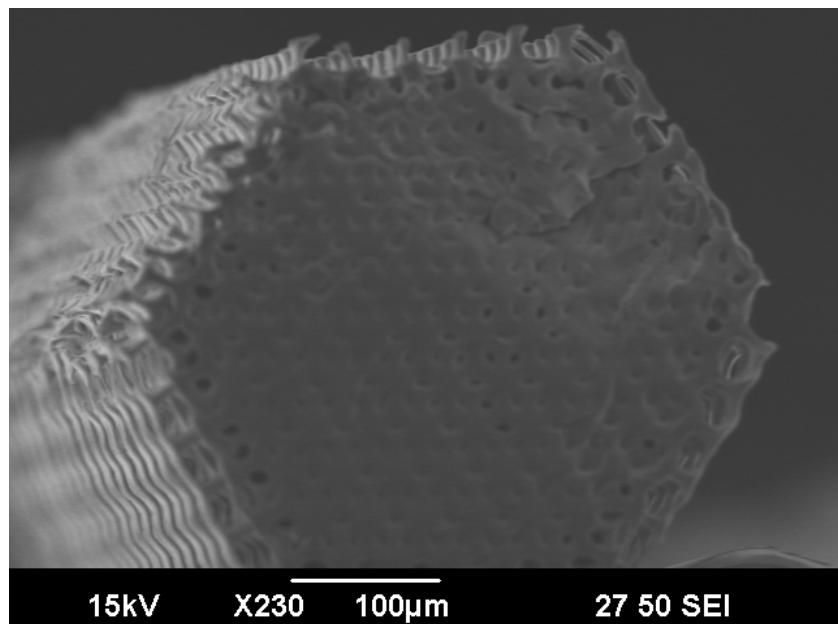
附圖 14 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒列印之結構頂部使用 (a)SEM(b)金相顯微鏡 拍攝比較圖



● 結構-30 通透性測試



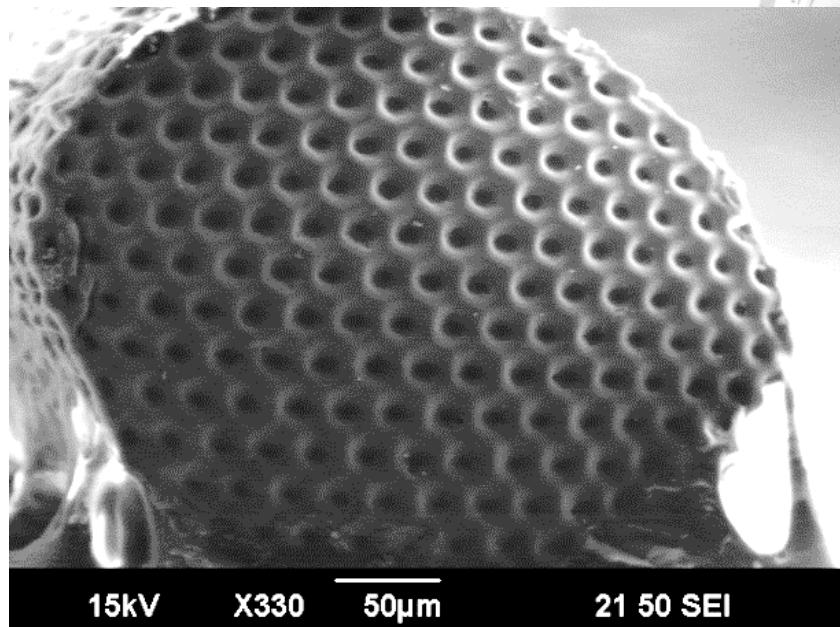
附圖 15 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒 斷面圖



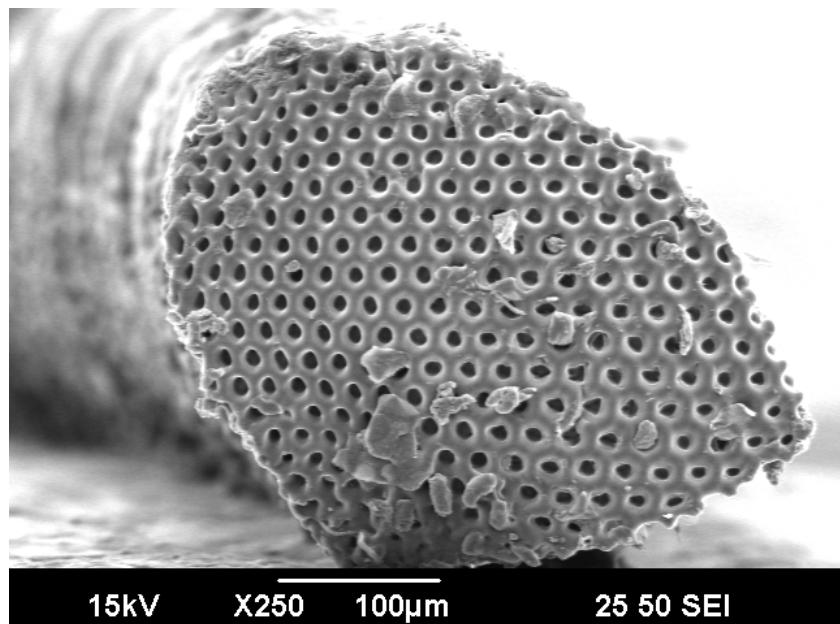
附圖 16 結構-30 樹酯 DB8 曝光時間 500 毫秒 斷面圖



● 結構-20 通透性測試



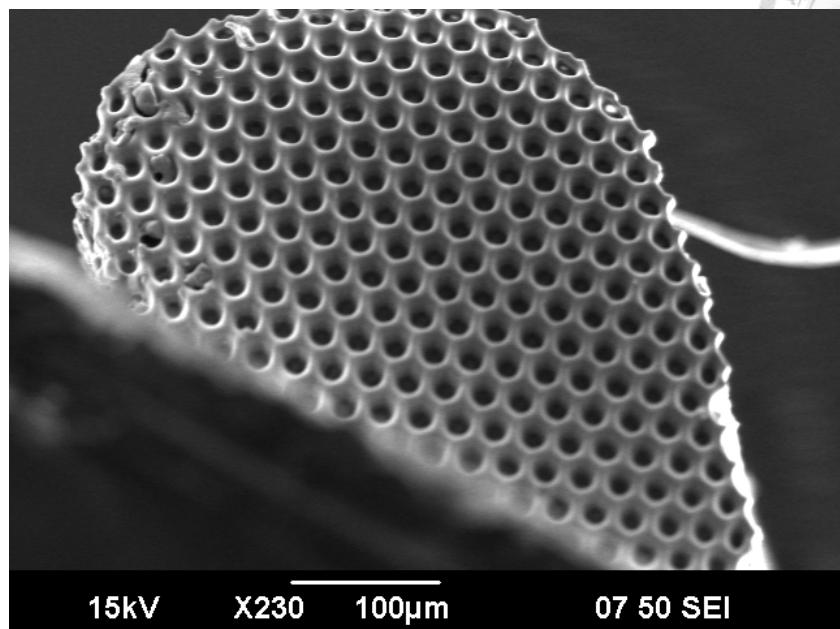
附圖 17 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 350 毫秒列印之結構頂部



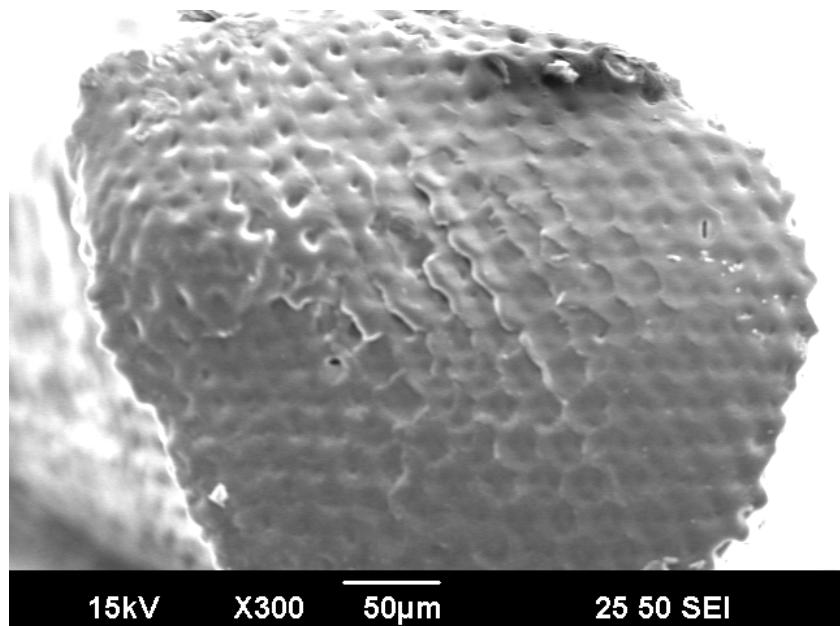
附圖 18 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部



● 結構-20 通透性測試



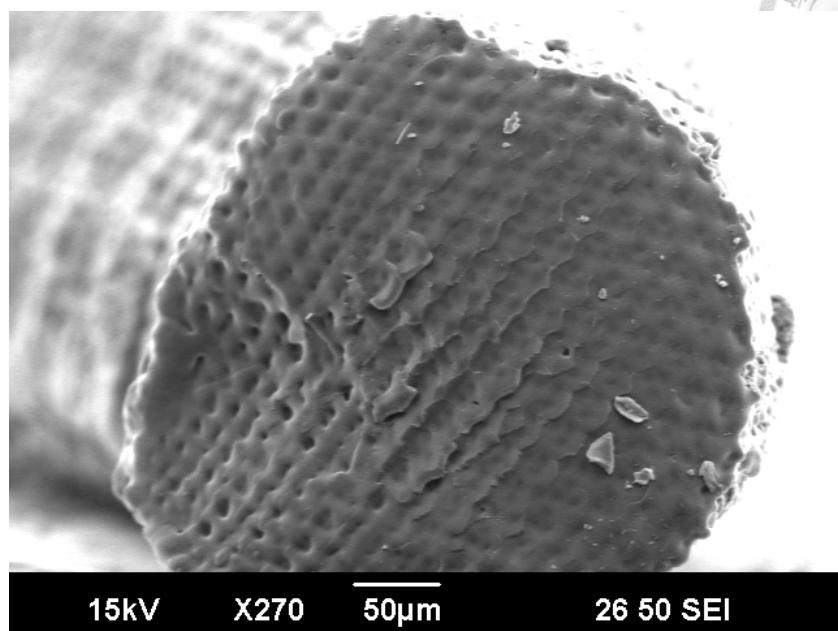
附圖 19 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部



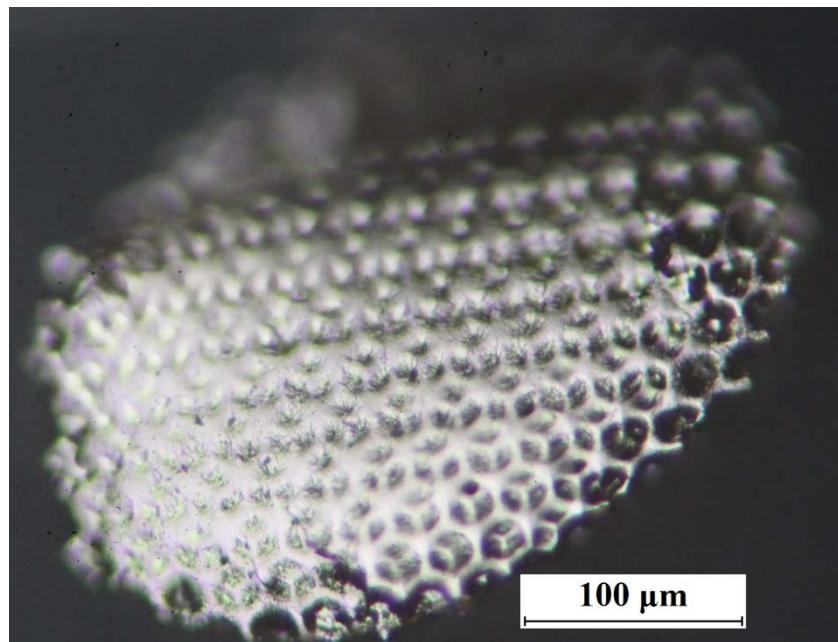
附圖 20 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面



● 結構-20 通透性測試



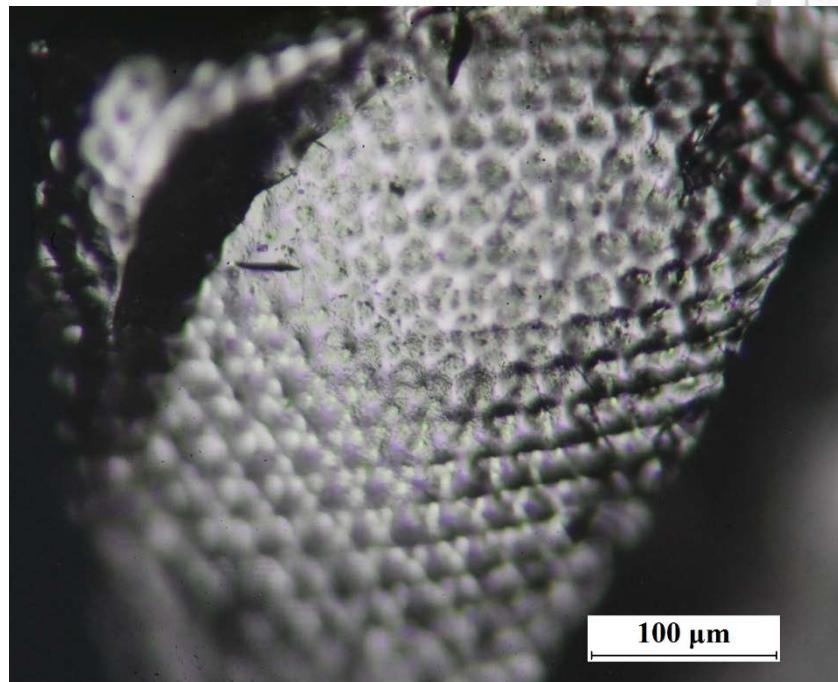
附圖 21 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面



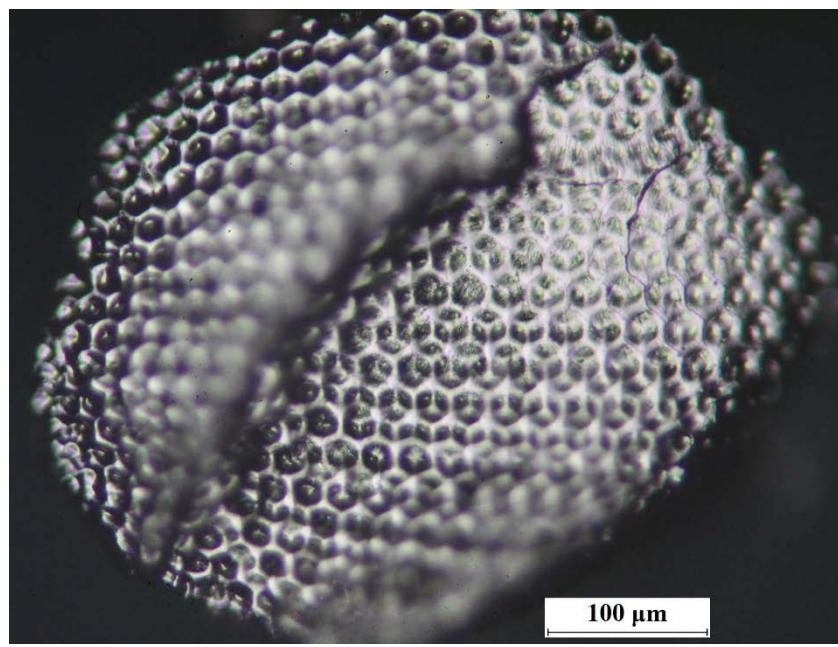
附圖 22 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面



● 結構-20 通透性測試



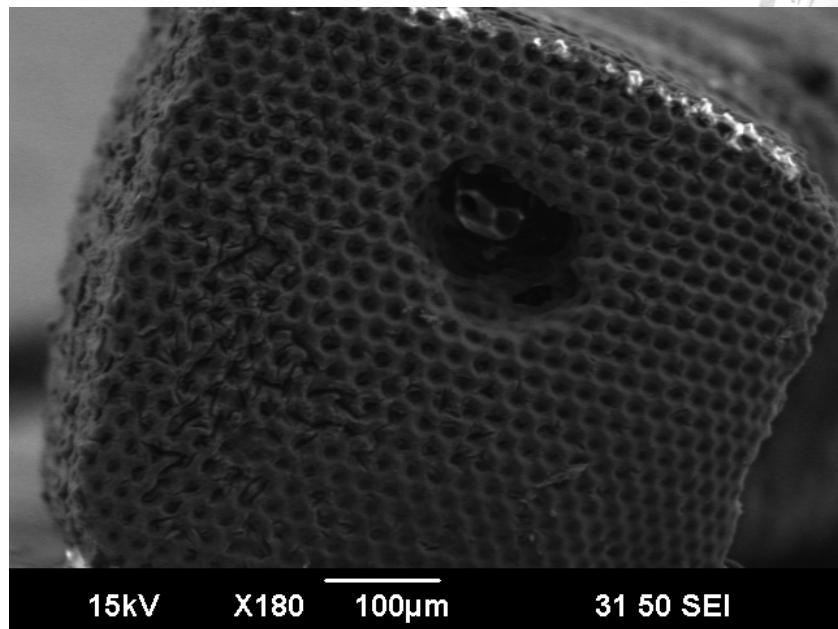
附圖 23 結構-20 樹脂 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面



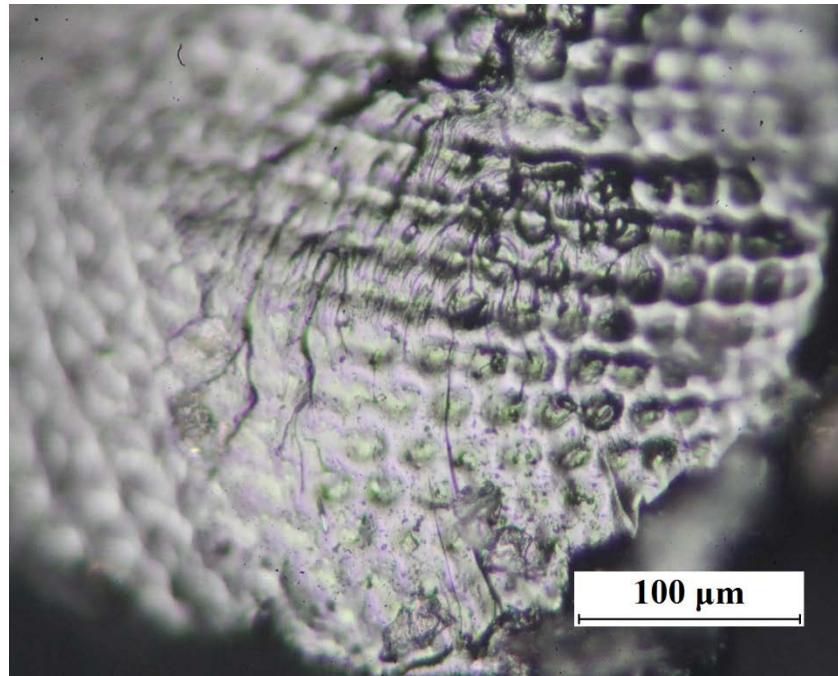
附圖 24 結構-20 樹脂 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面



● 結構-20 通透性測試(丙酮)



附圖 25 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構頂部



附圖 26 結構-20 樹酯 DB9、曝光時間 400 毫秒列印之結構斷面