

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

雷射於鈦-錫粉末燒結緻密化之探討

Optimization on Fiber Laser Sintering of Ti-Sn Powders

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-104 機械-1

執行期間： 104 年 1 月 1 日至 104 年 9 月 30 日

計畫主持人：廖信德

共同主持人：

計畫參與人員：李光智

處理方式：公開於校網頁

執行單位：機械工程系

中 華 民 國 104 年 9 月 30 日

摘要

隨著科技一直不斷地進步，人們對產品的要求也逐漸提高，各種產品都講求快速生產且創新多樣化，以提高市場競爭力。快速成型技術的發展相當蓬勃，因而大大縮短了產品開發的時間，但是其所使用的材料很少為金屬材料，也因此限制了快速模具的發展。

本研究以銅粉(75 μ m)、錫粉(74 μ m)金屬粉末為實驗材料，使用光纖雷射機進行燒結，再利用光學式顯微鏡觀察燒結後的結果並計算出孔隙率(Porosity)對於製程參數之關係，最後在統整數據來進行分析與討論。應用反應曲面法(Response Surface Method)，選定雷射功率(Laser Power)、燒結速度(Speed)、雷射頻率(Frequency)為雷射燒結之製程參數，並配合實驗計畫法(DOE)的應用，找出雷射燒結金屬粉末最佳化參數。

關鍵字：雷射燒結、快速成型、孔隙率、實驗計畫法

ABSTRACT

As science and technology being progressive constantly, various customers' demands for products are getting higher. The time to the market, cost, innovation, diversification of the products are emphasized in order to raise the competitiveness of market. The technology of rapid prototyping grows up very prosperous. It hugely reduces the developing time of new products. However, metal materials are seldom used so far. This has limited the application of the rapid prototyping.

The metal powders that the experiments use in this research are tin powder of 74 μm and copper powder of 74 μm . The fiber laser is used to sinter the mixed metal powders. The results of sintering are observed by the optical microscope and then calculate the porosity of sintered specimen. Finally, Response Surface Method is applied to investigate and analyze the effect of laser power, sintering speed, and frequency on the porosity. Together with Design of Experiment, optimal parameter setting is obtained for the better quality of metal rapid prototyping.

Keywords: Laser Sintering, Rapid Prototyping, Porosity, Design of Experiment.

目錄

摘要.....	II
英文摘要.....	III
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
一、前言.....	1
二、研究目的.....	3
三、研究方法.....	4
四、實驗結果與分析.....	7
五、結論.....	44
參考文獻.....	45
計畫成果自評表.....	47

表目錄

表 3.1 研究流程表.....	4
表 3.2 實驗參數與水準.....	6
表 4.1(a)雷射燒結結果.....	7
表 4.1(b)雷射燒結結果.....	8
表 4.1(c)雷射燒結結果.....	9
表 4.2 孔隙率變異數分析結果.....	37
表 4.3 輸出品質特性目標與規格限制.....	42
表 4.4 反應曲面法預測最佳參數組合.....	43
表 4.5 驗證結果與誤差.....	43

圖目錄

圖 3.1 光纖雷射試驗機台.....	5
圖 3.2 高精密度顯微鏡.....	6
圖 4.1 NO.1 孔隙率為 7.886%.....	10
圖 4.2 NO.2 孔隙率為 12.474%.....	10
圖 4.3 NO.3 孔隙率為 9.722%.....	10
圖 4.4 NO.4 孔隙率為 7.649%.....	11
圖 4.5 NO.5 孔隙率為 12.022%.....	11
圖 4.6 NO.6 孔隙率為 9.496%.....	11
圖 4.7 NO.7 孔隙率為 17.474%.....	12
圖 4.8 NO.8 孔隙率為 15.254%.....	12
圖 4.9 NO.9 孔隙率為 11.134%.....	12
圖 4.10 NO.10 孔隙率為 4.601%.....	13
圖 4.11 NO.11 孔隙率為 14.525%.....	13
圖 4.12 NO.12 孔隙率為 13.212%.....	13
圖 4.13 NO.13 孔隙率為 6.969%.....	14
圖 4.14 NO.14 孔隙率為 13.025%.....	14
圖 4.15 NO.15 孔隙率為 6.471%.....	14
圖 4.16 NO.16 孔隙率為 16.263%.....	15
圖 4.17 NO.17 孔隙率為 3.691%.....	15
圖 4.18 NO.18 孔隙率為 17.385%.....	15
圖 4.19 NO.19 孔隙率為 5.12%.....	16
圖 4.20 NO.20 孔隙率為 19.343%.....	16
圖 4.21 NO.21 孔隙率為 11.185%.....	16
圖 4.22 NO.22 孔隙率為 23.197%.....	17

圖 4.23 NO.23 孔隙率為 10.335%.....	17
圖 4.24 NO.24 孔隙率為 4.566%.....	17
圖 4.25 NO.25 孔隙率為 12.171%.....	18
圖 4.26 NO.26 孔隙率為 12.551%.....	18
圖 4.27 NO.27 孔隙率為 9.351%.....	18
圖 4.28 NO.28 孔隙率為 7.439%.....	19
圖 4.29 NO.29 孔隙率為 9.42%.....	19
圖 4.30 NO.30 孔隙率為 9.607%.....	19
圖 4.31 NO.31 孔隙率為 10.175%.....	20
圖 4.32 NO.32 孔隙率為 15.637%.....	20
圖 4.33 NO.33 孔隙率為 5.377%.....	20
圖 4.34 NO.34 孔隙率為 2.554%.....	21
圖 4.35 NO.35 孔隙率為 14.028%.....	21
圖 4.36 NO.36 孔隙率為 16.539%.....	21
圖 4.37 NO.37 孔隙率為 11.892%.....	22
圖 4.38 NO.38 孔隙率為 9.459%.....	22
圖 4.39 NO.39 孔隙率為 11.742%.....	22
圖 4.40 NO.40 孔隙率為 13.365%.....	23
圖 4.41 NO.41 孔隙率為 23.345%.....	23
圖 4.42 NO.42 孔隙率為 16.787%.....	23
圖 4.43 NO.43 孔隙率為 5.941%.....	24
圖 4.44 NO.44 孔隙率為 4.106%.....	24
圖 4.45 NO.45 孔隙率為 21.313%.....	24
圖 4.46 NO.46 孔隙率為 14.58%.....	25
圖 4.47 NO.47 孔隙率為 6.568%.....	25
圖 4.48 NO.48 孔隙率為 3.902%.....	25

圖 4.49 NO.49 孔隙率為 5.131%.....	26
圖 4.50 NO.50 孔隙率為 8.091%.....	26
圖 4.51 NO.51 孔隙率為 18.44%.....	26
圖 4.52 NO.52 孔隙率為 13.909%.....	27
圖 4.53 NO.53 孔隙率為 14.602%.....	27
圖 4.54 NO.54 孔隙率為 8.68%.....	27
圖 4.55 NO.55 孔隙率為 6.038%.....	28
圖 4.56 NO.56 孔隙率為 8.476%.....	28
圖 4.57 NO.57 孔隙率為 17.09%.....	28
圖 4.58 NO.58 孔隙率為 11.534%.....	29
圖 4.59 NO.59 孔隙率為 22.221%.....	29
圖 4.60 NO.60 孔隙率為 13.056%.....	29
圖 4.61 NO.61 孔隙率為 18.942%.....	30
圖 4.62 NO.62 孔隙率為 7.596%.....	30
圖 4.63 NO.63 孔隙率為 14.17%.....	30
圖 4.64 NO.64 孔隙率為 11.145%.....	31
圖 4.65 NO.65 孔隙率為 8.092%.....	31
圖 4.66 NO.66 孔隙率為 8.396%.....	31
圖 4.67 NO.67 孔隙率為 19.071%.....	32
圖 4.68 NO.68 孔隙率為 8.249%.....	32
圖 4.69NO.69 孔隙率為 9.255%.....	32
圖 4.70 NO.70 孔隙率為 8.396%.....	33
圖 4.71 NO.71 孔隙率為 2.378%.....	33
圖 4.72 NO.72 孔隙率為 16.512%.....	33
圖 4.73 NO.73 孔隙率為 12.422%.....	34
圖 4.74 NO.74 孔隙率為 9.337%.....	34

圖 4.75 NO.75 孔隙率為 15.702%.....	34
圖 4.76 NO.76 孔隙率為 9.899%.....	35
圖 4.77 NO.77 孔隙率為 12.495%.....	35
圖 4.78 NO.78 孔隙率為 4.991%.....	35
圖 4.79 NO.79 孔隙率為 16.17%.....	36
圖 4.80 NO.80 孔隙率為 14.678%.....	36
圖 4.81 NO.81 孔隙率為 15.153%.....	36
圖 4.82 孔隙率之殘差與實驗順序檢驗圖.....	38
圖 4.83 殘差常態機率圖.....	39
圖 4.84 實驗順序之離群值檢驗圖.....	40
圖 4.85 孔隙率之殘差與預測值檢驗圖.....	41
圖 4.86 迴歸預測值.....	42
圖 4.87 實驗驗證孔隙率為 5.355%.....	43

一、前言

早期快速成型的發展朝向注重於建構一個可觸摸的實體來支援設計工作，例如建構一個忽略機能與性能之三維實體物件。在快速成型系統上，由於材料的選用有許多的限制，且機器的成本很高，因此廠商不斷的在研究更多範圍應用，包括功能評估、測試應用及最終加工。這不僅是要求快速成型技術的改進，以及建構強度更高更精密的工件，更要發展更廣泛的材料應用範圍，包括金屬與陶瓷合成物。快速成型在製造上最大的突破是在增加、改進產品發展的同時，也能縮短產品從概念到上市的時間以及降低成本，包括了在航太、汽車、生物醫學、珠寶、錢幣以及餐具工業上應用的實例。這些並不代表所有的應用，不過卻也象徵了快速成型在工業上有廣泛的運用[1]。

隨著整體快速成型工業的推動，快速成型的發展活動持續的進行，國內近幾年來，相關設備也增加很多，積極的投入這方面的研究。林嘉緯[2]以新式快速原型製造技術之陶瓷雷射燒結法為製程基礎，配合硬體材料處理系統，設計及製作控制系統，以達到快速原型製造方法自動化的目的。嚴孝全[3]研究陶瓷雷射燒結快速原型系統，藉此系統提升製作陶瓷快速原型工件的尺寸精度與表面粗糙度；研發鋪層快乾不裂的乾燥技術，有效減少工件製作時間。蘇紘建[4]提升工件強度與發展黏結劑分別為黏土及聚乙烯醇之生薄層塊之去除方式。藉由改變漿料配方以及建立雷射掃描成型參數與後處理，使完成後的工件緻密度及強度提高；最終找到將陶瓷生薄層塊置入過氧化氫溶液中並搭配超音波震盪的方式可有效的去除氧化鋁陶瓷生薄層塊。謝立祥[5]研究陶瓷雷射燒結法形成的工件之尺寸之變異，以實驗結果選擇最佳材料配方與製程方式，製作小型化工件。探討工件尺寸精度與製程材料、雷射參數、清料製程、緻密化燒結製程與之關係。邱銘祿[6]以漿料間接選擇性雷射燒結法的新式快速原型技術來製作陶瓷工件，研發一種披覆防水有機黏結劑的陶瓷粉末，調配成漿料，經鋪層、乾燥、雷射掃描及清料等步驟，製作出陶瓷生工件，再將陶瓷生工件以高溫緻密化燒結。黃智德[7]

以陶瓷雷射燒結製程製作工件之燒結精度研究，將著重在燒結收縮誤差。探討不同粒徑大小及形狀對生坯塊及雷射掃描生工件各區域 X、Y、Z 三個軸向的收縮率標準差及緻密度標準差的影響，及瞭解由不同黏結劑製作陶瓷試塊之收縮率，作為建構 3D 模型時補償收縮尺寸之參考。王鈴鈞[8]利用拉曼光譜觀察雷射光照射 MgO+V2O5 不同比例混合粉末樣品，探討樣品經雷射照射後產生 MgV2O6 與 Mg2V2O7 結構的相變過程與相變機制。李坤達[9]針對工件分層問題改善機台設備，利用 CO2 雷射，以此製程用含有平均粒徑 13 μ m 之氧化矽陶瓷粉末之漿料來製作陶殼模，利用次微米的氧化鋁陶瓷粉來製作陶殼模，使陶殼膜表面可以較為細緻並且研究使用 Nd:YAG 雷射製作陶殼模以得到細緻特徵。德國的 A. Simchi[10]探討雷射燒結製程參數對鐵粉末的微結構與緻密性的影響。Dr.Zhou[11]提出了改進快速金屬成型中如何控制收縮的相關技術。Tolochko[12]討論雷射對單金屬粉末與雙金屬粉末燒結的影響。Morgan[13]以進行實驗探討奈米脈衝 Nd:YAG 雷射各種參數對燒結製程的影響。

快速成型技術在醫學領域上的應用也是相當廣泛的，李威勳[14]開發一套雷射燒結組織支架製作之技術，利用 Solidworks 進行設備結構、組織支架製作平台結構、CO2 雷射模組及氣壓避震模組等設計製作。潘楷明[15]利用雷射燒結快速成型機進行骨水泥孔洞支架設計與製作，並針對影響骨水泥孔洞支架快速成型品質之三項製程參數(即雷射功率、雷射光移動速度與材料預熱溫度等)進行燒結實驗分析，並探討不同雷射功率、雷射光移動速度及材料預熱溫度下雷射燒結製程參數最適當之組合。劉喜文[16]開發雷射燒結快速成型系統，設計、製造生物可吸收聚己內酯(PCL)立體孔洞支架，透過巨觀、微觀結構分析實驗，觀察不同孔洞支架之孔洞形狀、大小、分布均勻性及孔洞間之交聯性，並測定支架之抗拉、抗壓強度和孔隙率，以了解多孔性支架是否有足夠抗拉、抗壓強度及具備細胞植入後貼附與生長的孔洞結構。

二、 研究目的

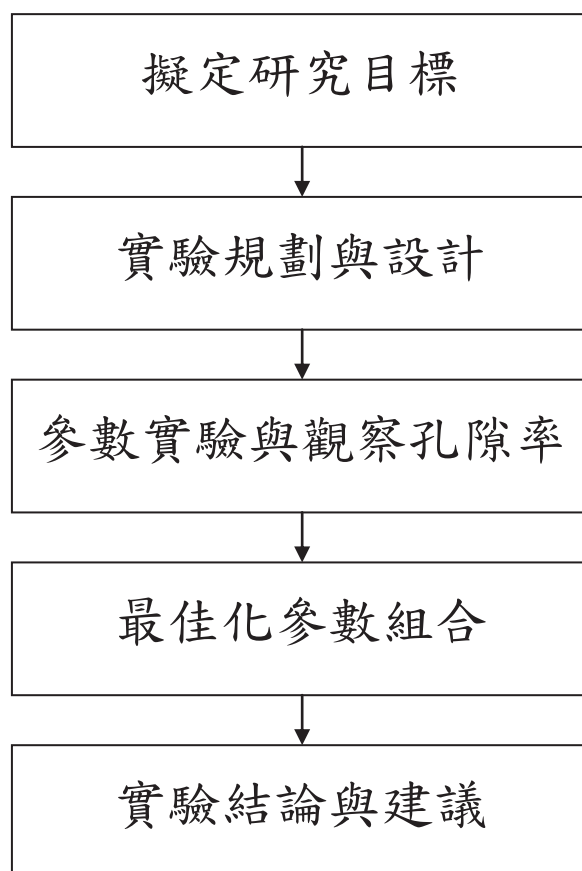
自從 1988 年第一台快速成型(RP)系統問世後，RP 工業成長率顯著地上升，成長速率相當驚人。快速成型系統可以於無須運用刀具加工下直接製作功能性元件並進行少量加工，減少材料的浪費、耗材的損失、材料的運輸成本，可以減低經費的開銷。RP 工業仍然持續在擴大。已有更多的快速系統問世，且有更多種的材料可運用於這一些快速系統上，以及也有更多技術的新應用陸續被研發。

本研究之目的在利用光纖雷射燒結金屬粉末的過程中，找尋影響燒結最終品質之製程參數如雷射強度、燒結速度、雷射頻率、雷射聚焦點位置、金屬粉末顆粒大小及混合比例...等等因素，並配合實驗計畫法的應用，得到最佳的製程參數之設定，以便未來提供製作快速成型金屬模具機中成型材料的相關技術，而燒結的結果使用 Nikon MM-400 工具顯微鏡來觀察表面，在經由二值化計算出金屬粉末燒結後之孔隙率。

三、 研究方法

本研究利用實驗計畫法(Design Of Expert)設計進行實驗設計的規劃。使用光纖雷射進行燒結，燒結成型的試片經過拋光加工後可獲得光滑且平整的表面，再使用高精密度顯微鏡拍下試片的表面，經由 ANOVA 進行分析，最後求出最佳參數組合，研究流程圖如表 3.1 所示。

表 3.1 研究流程表



3.1 實驗設備

3.1.1 光纖雷射試驗機台

本實驗使用 Ytterbium Fiber Laser 光纖雷射(IPG Laser GmbH YLR-200-AC)。
同時架設 3D 控制平台，最大輸出功率可達 200W。機台如圖 3.1 所示。



圖 3.1 光纖雷射試驗機台

3.1.2 高精密度測顯微鏡

燒結試片經過拋光處理後，表面係應用高精密度測顯微鏡(Nikon Measuring Microscope MM-400 Series, Japan)來觀察金屬粉末燒結後的混合情形，如圖 3.2 所示。



圖 3.2 高精密度量測顯微鏡

3.2 實驗規劃

3.2.1 實驗參數與水準

雷射燒結金屬粉末，係應用實驗計畫法規劃實驗，選定雷射光功率(Laser Power)、掃描速率(Scan rate)、雷射脈衝頻率(Pulse Frequency)為製程參數，其各參數皆為三個水準，參數水準如表 3.2 所示，參數設計為先前參考資料並與教授討論，經過實驗測試不同參數、金屬粉末比例後決定。孔隙率(Porosity)為研討的目標。

表 3.2 實驗參數與水準

Level of experimental factors	Laser Power(W)	Scan rate(mm/s)	Pulse Frequency(Hz)
Level 1	26	8	130
Level 2	28	9	140
Level 3	30	10	150

四、 實驗結果與分析

本章節將對實驗後所得到的數據進行分析，探討各種參數所影響的結果，且將建構可表示輸入製造參數和輸出品質特性的迴歸模型。同時，分別找出利用田口分析法與實驗設計法所得到的最佳製程參數組合，並驗證其有效性，詳細流程於本章中說明。

4.1 實驗結果

利用高精密度顯微鏡 MM400，清楚觀察圖像的金屬分佈；Vision Assistant Labview 軟體來計算處理金屬圖像的孔隙率百分比，如表 4.1(a)、(b)、(c)中的實驗使用 General Factorial 依序排列組合，其顯示了孔隙率的百分比。圖 4.1(a)為顯微鏡拍攝出的金屬分佈圖。圖 4.1(b)由 Vision Assistant Labview 軟體進行二值化分析，運算孔隙面積。

表 4.1(a)雷射燒結結果

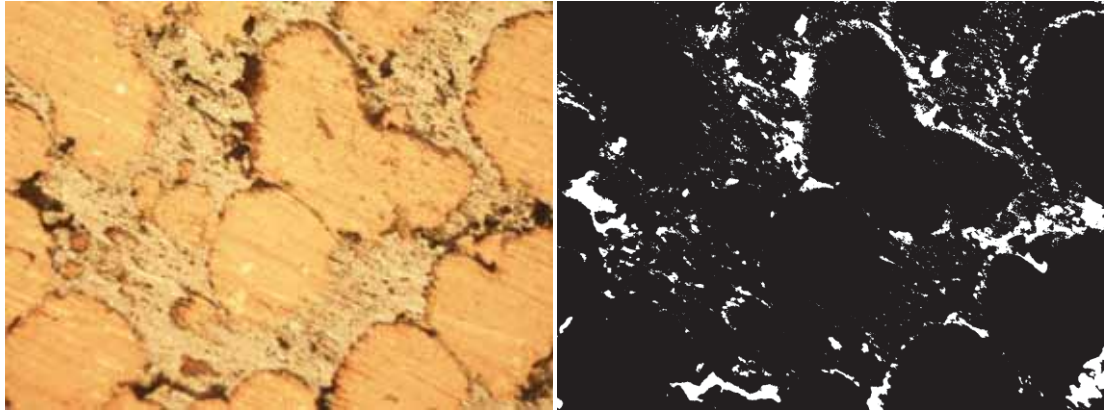
Run	Power (w)	Speed (mm/s)	Frequency (Hz)	Porosity (%)
1	30	8	130	7.886
2	28	10	140	12.474
3	30	8	150	9.722
4	26	8	140	7.649
5	26	9	130	12.022
6	26	10	150	9.496
7	26	8	150	17.474
8	28	8	140	15.254
9	30	9	130	11.134
10	30	10	140	4.601
11	26	9	150	14.525
12	26	9	140	13.212
13	30	10	150	6.969
14	26	10	130	13.025
15	28	8	130	6.471
16	26	10	140	16.263
17	26	8	130	3.691

表 4.1(b)雷射燒結結果

Run	Power (w)	Speed (mm/s)	Frequency (Hz)	Porosity (%)
18	30	10	130	17.385
19	28	10	130	5.12
20	28	9	140	19.343
21	30	9	150	11.185
22	30	9	140	23.197
23	30	8	140	10.335
24	28	9	130	4.566
25	28	10	150	12.171
26	28	8	150	12.551
27	28	9	150	9.351
28	28	10	130	7.439
29	26	8	130	9.42
30	28	10	140	9.607
31	26	10	130	10.175
32	26	10	150	15.637
33	30	10	150	5.377
34	30	8	130	2.554
35	30	10	140	14.028
36	26	10	140	16.539
37	28	9	150	11.892
38	28	10	150	9.459
39	26	8	140	11.742
40	26	9	130	13.365
41	28	8	140	23.345
42	30	9	130	16.787
43	26	8	150	5.941
44	28	8	130	4.106
45	30	9	140	21.313
46	30	8	150	14.58
47	30	8	140	6.568
48	26	9	140	3.902
49	28	9	130	5.131
50	30	9	150	8.091
51	26	9	150	18.44

表 4.1(c)雷射燒結結果

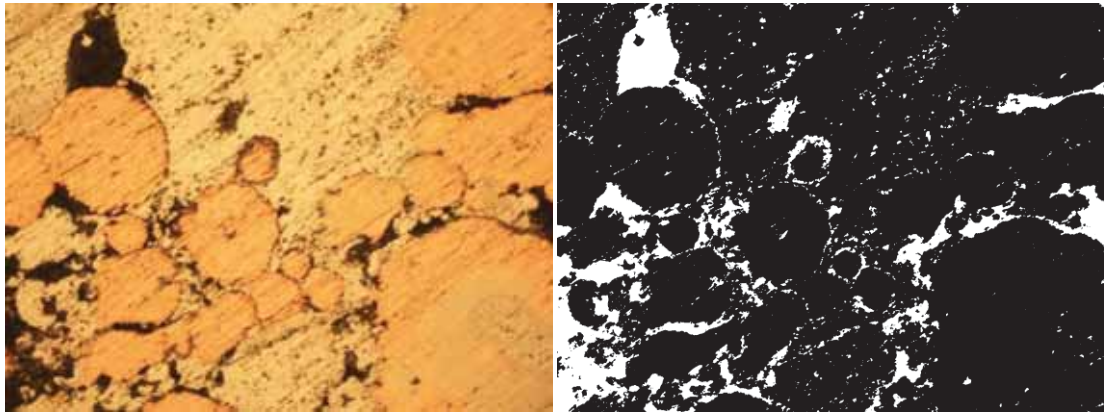
Run	Power (w)	Speed (mm/s)	Frequency (Hz)	Porosity (%)
52	28	9	140	13.909
53	30	10	130	14.602
54	28	8	150	8.68
55	26	10	130	6.038
56	26	9	140	8.476
57	28	9	140	17.09
58	30	9	140	11.534
59	26	10	150	22.221
60	28	10	140	13.056
61	30	9	130	18.942
62	26	8	140	7.596
63	28	8	140	14.17
64	28	10	130	11.145
65	30	8	130	8.092
66	30	9	150	8.396
67	30	8	140	19.071
68	28	10	150	8.249
69	28	9	130	9.255
70	30	8	150	8.396
71	30	10	150	2.378
72	30	10	140	16.512
73	26	8	130	12.422
74	26	10	140	9.337
75	30	10	130	15.702
76	28	8	150	9.899
77	28	9	150	12.495
78	28	8	130	4.991
79	26	9	150	16.17
80	26	9	130	14.678
81	26	8	150	15.153



(a)

(b)

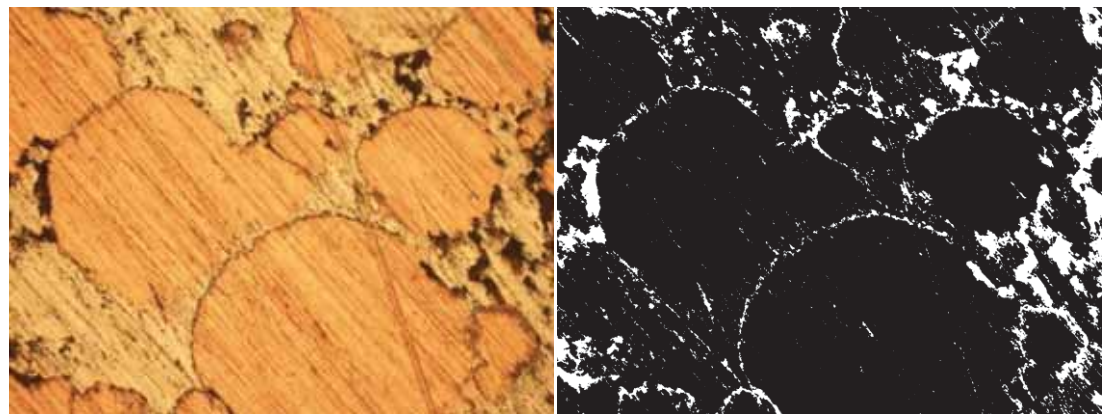
圖 4.1 NO.1 孔隙率為 7.886%



(a)

(b)

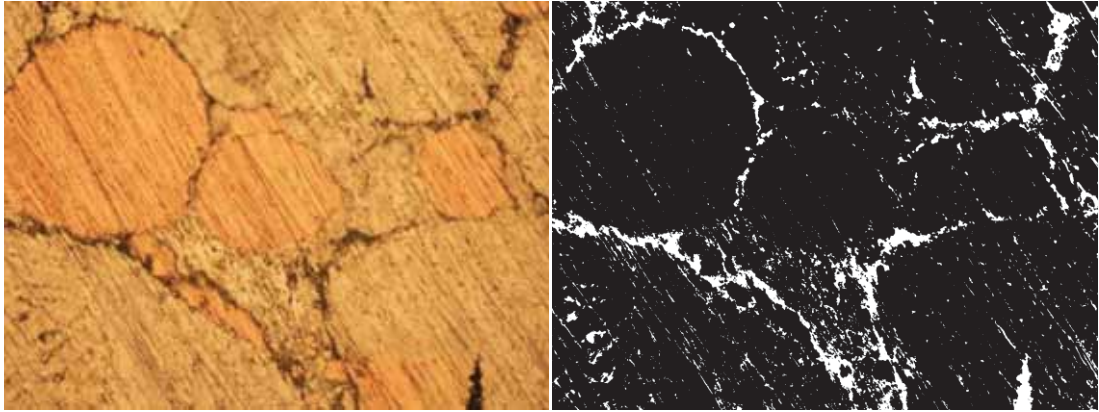
圖 4.2 NO.2 孔隙率為 12.474%



(a)

(b)

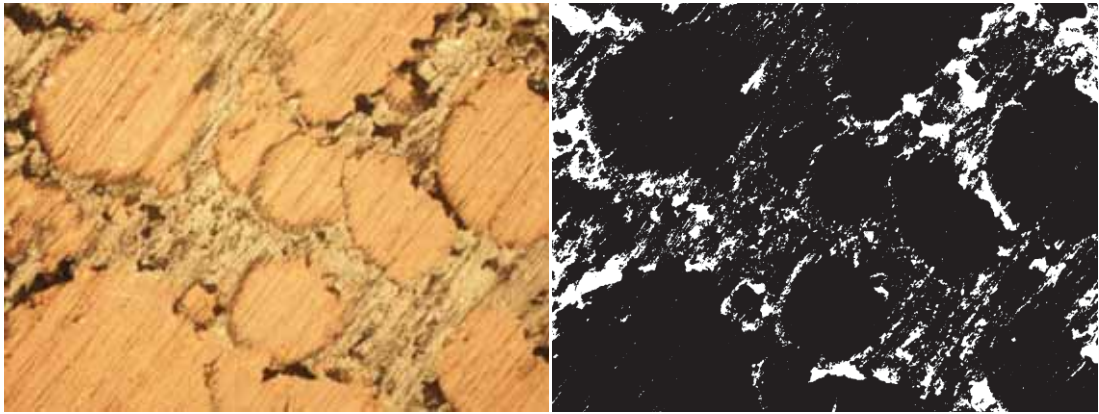
圖 4.3 NO.3 孔隙率為 9.722%



(a)

(b)

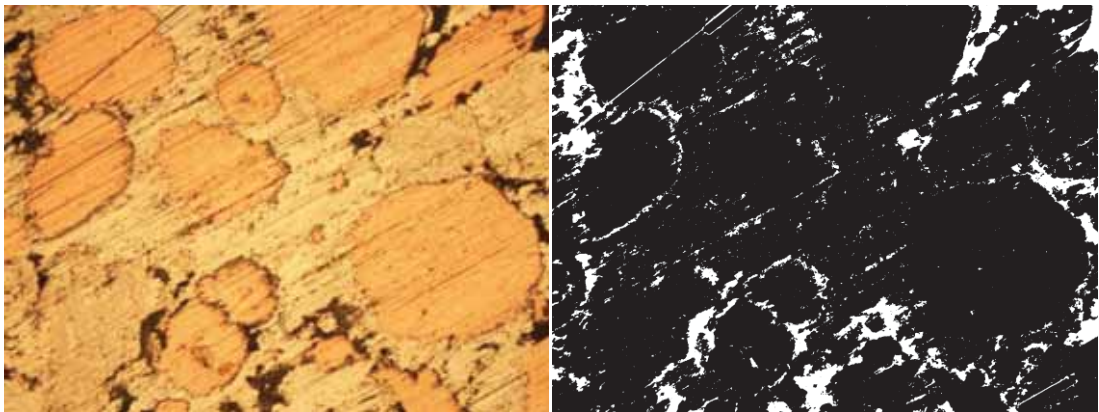
圖 4.4 NO.4 孔隙率為 7.649%



(a)

(b)

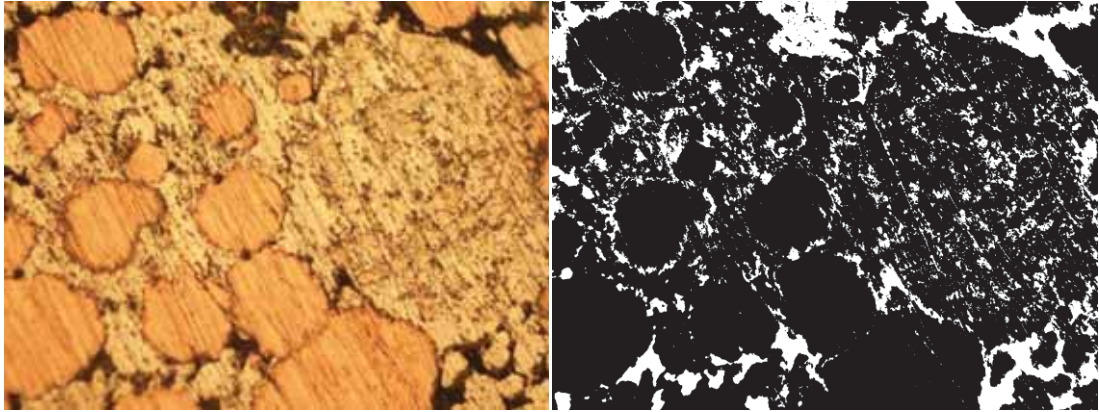
圖 4.5 NO.5 孔隙率為 12.022%



(a)

(b)

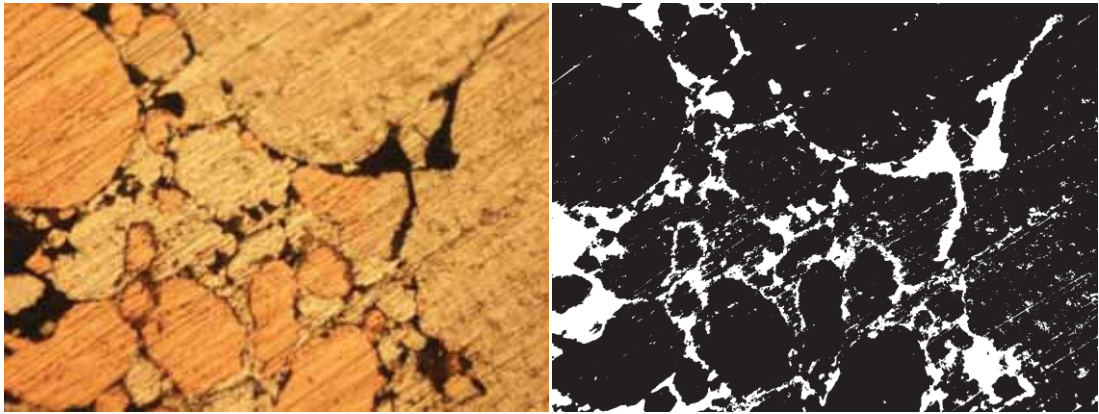
圖 4.6 NO.6 孔隙率為 9.496%



(a)

(b)

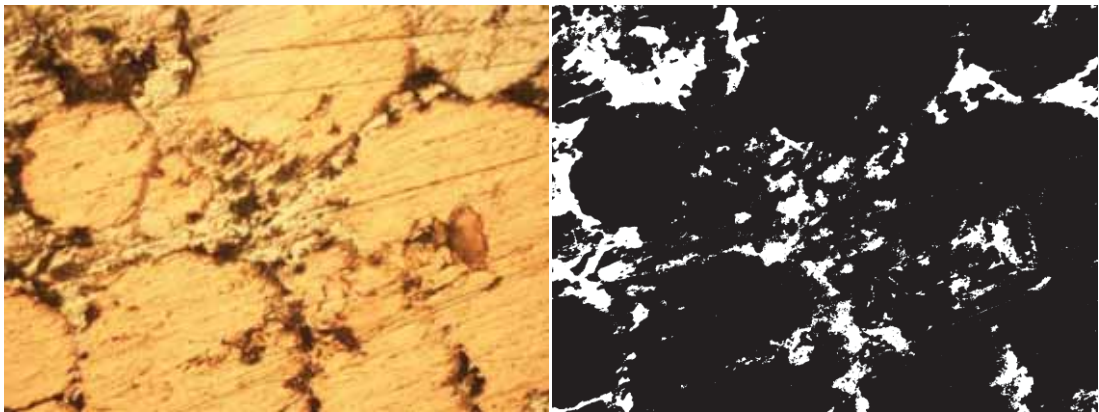
圖 4.7 NO.7 孔隙率為 17.474%



(a)

(b)

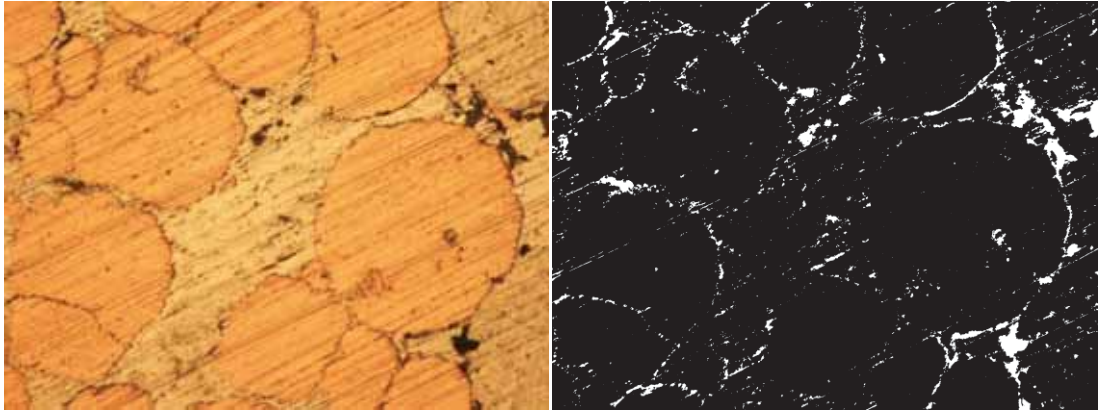
圖 4.8 NO.8 孔隙率為 15.254%



(a)

(b)

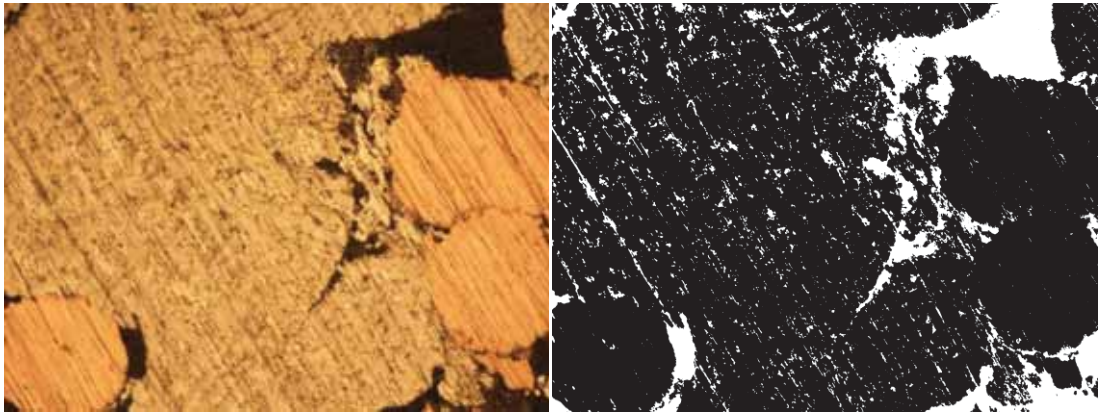
圖 4.9 NO.9 孔隙率為 11.134%



(a)

(b)

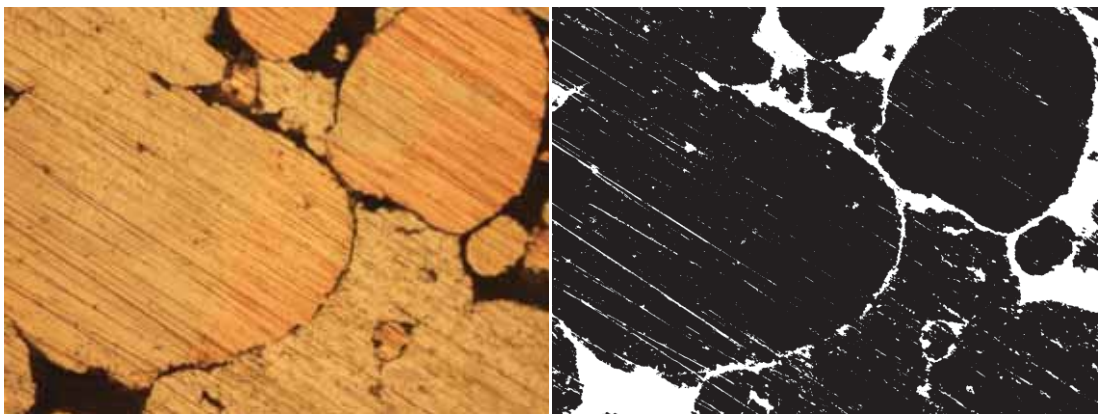
圖 4.10 NO.10 孔隙率為 4.601%



(a)

(b)

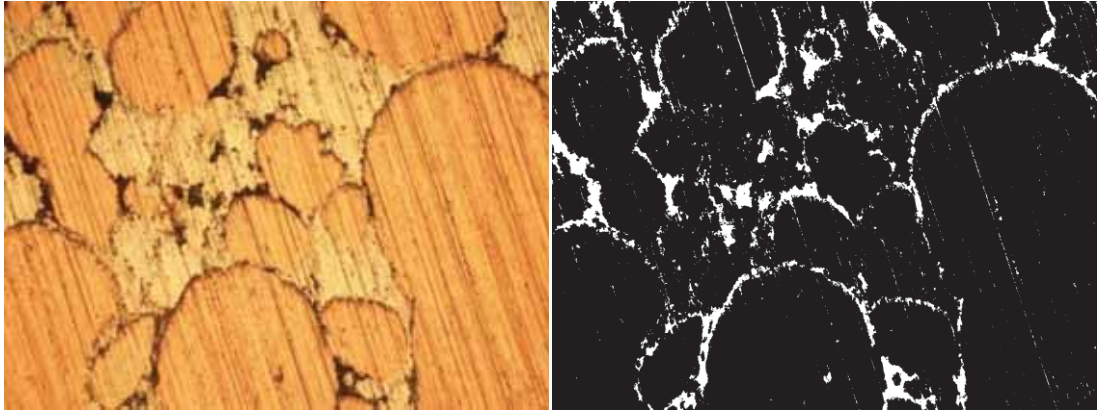
圖 4.11 NO.11 孔隙率為 14.525%



(a)

(b)

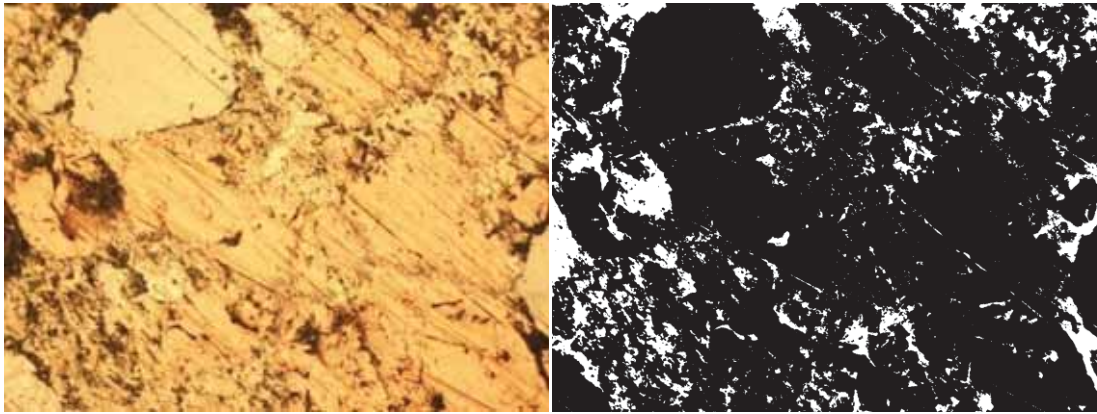
圖 4.12 NO.12 孔隙率為 13.212%



(a)

(b)

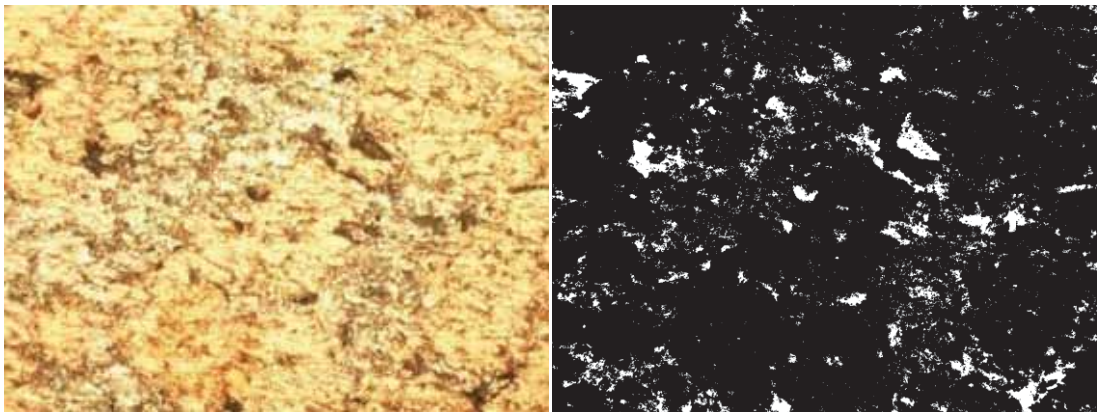
圖 4.13 NO.13 孔隙率為 6.969%



(a)

(b)

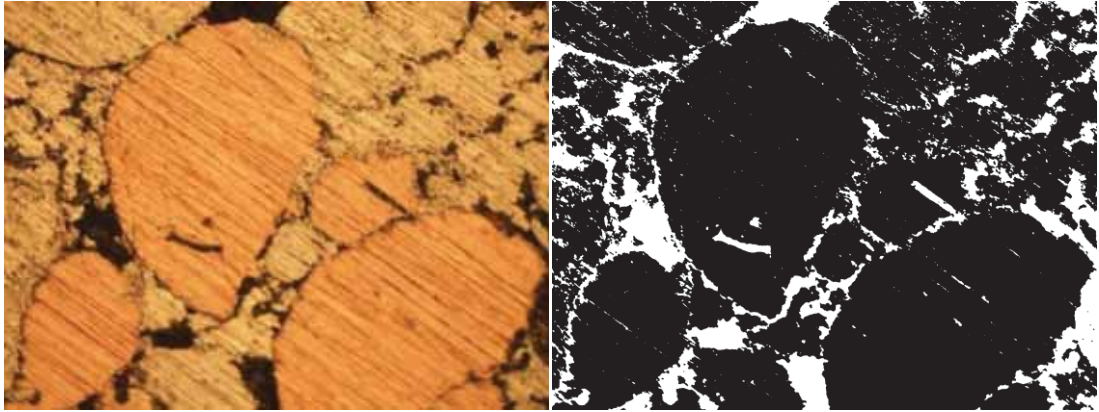
圖 4.14 NO.14 孔隙率為 13.025%



(a)

(b)

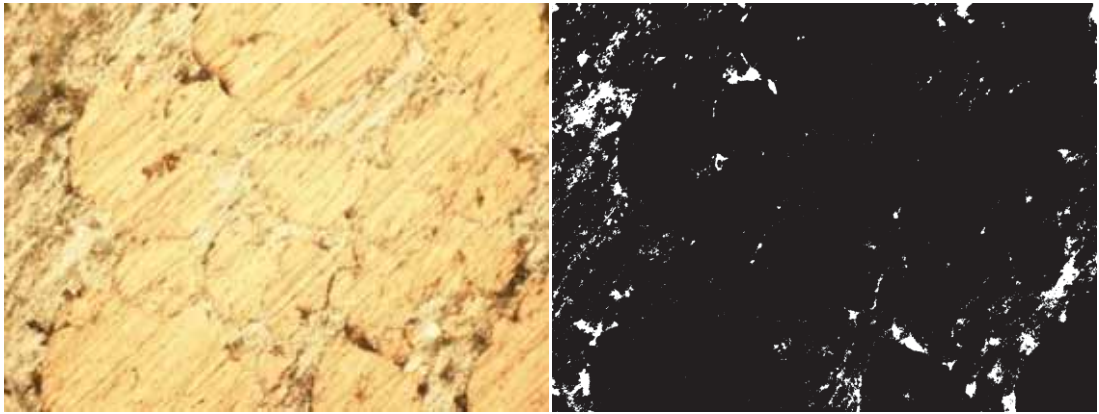
圖 4.15 NO.15 孔隙率為 6.471%



(a)

(b)

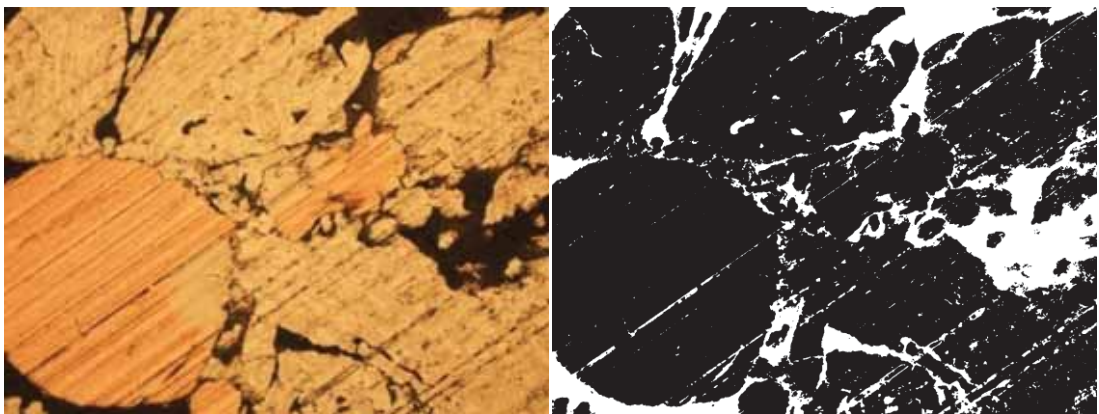
圖 4.16 NO.16 孔隙率為 16.263%



(a)

(b)

圖 4.17 NO.17 孔隙率為 3.691%



(a)

(b)

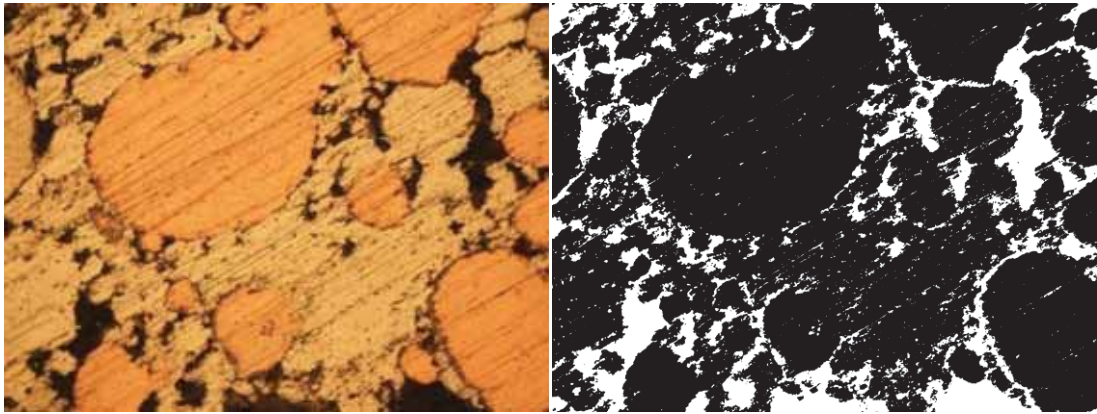
圖 4.18 NO.18 孔隙率為 17.385%



(a)

(b)

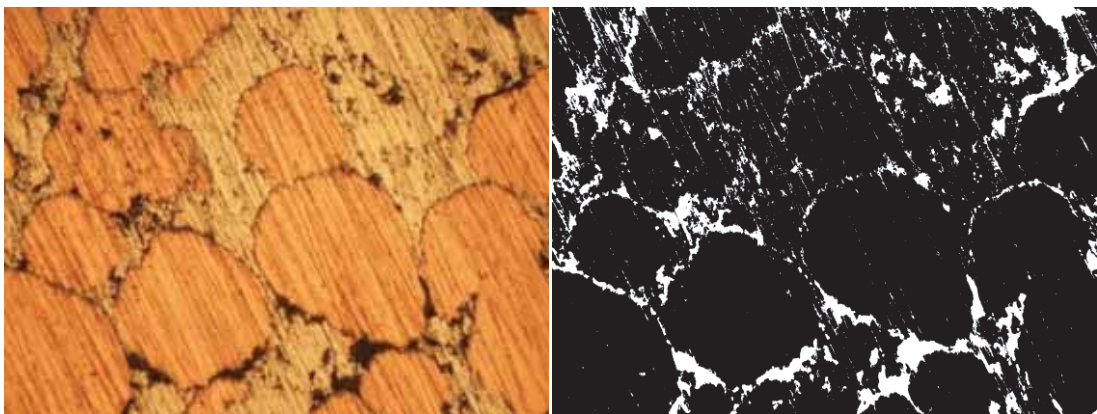
圖 4.19 NO.19 孔隙率為 5.12%



(a)

(b)

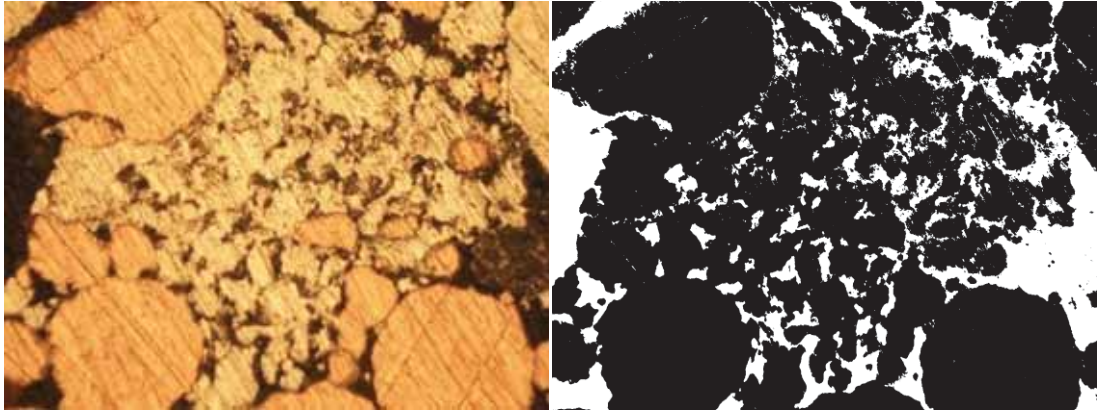
圖 4.20 NO.20 孔隙率為 19.343%



(a)

(b)

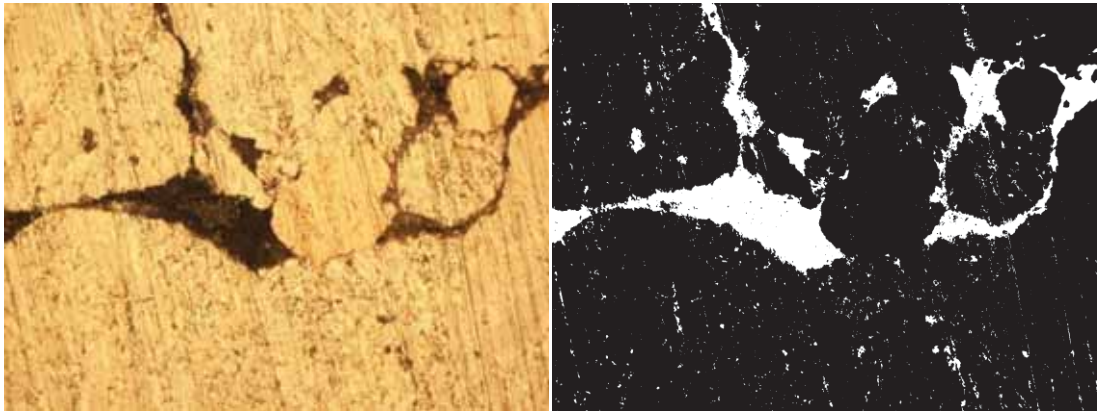
圖 4.21 NO.21 孔隙率為 11.185%



(a)

(b)

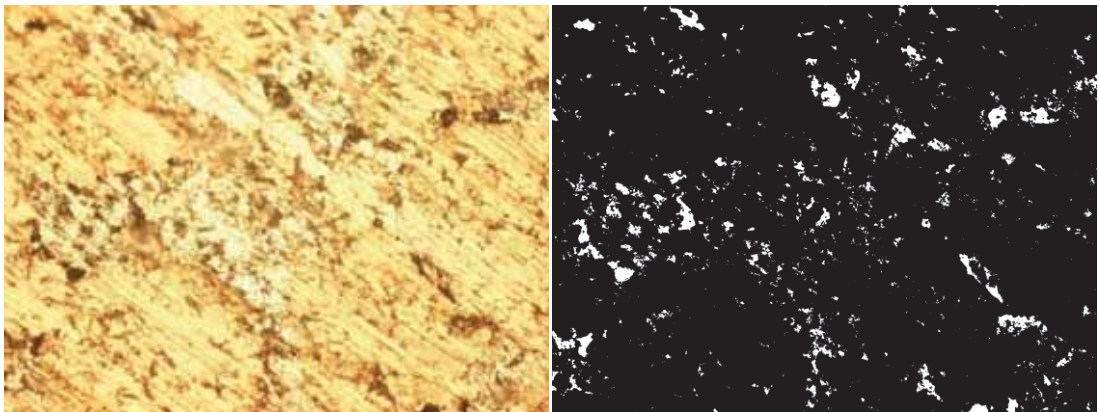
圖 4.22 NO.22 孔隙率為 23.197%



(a)

(b)

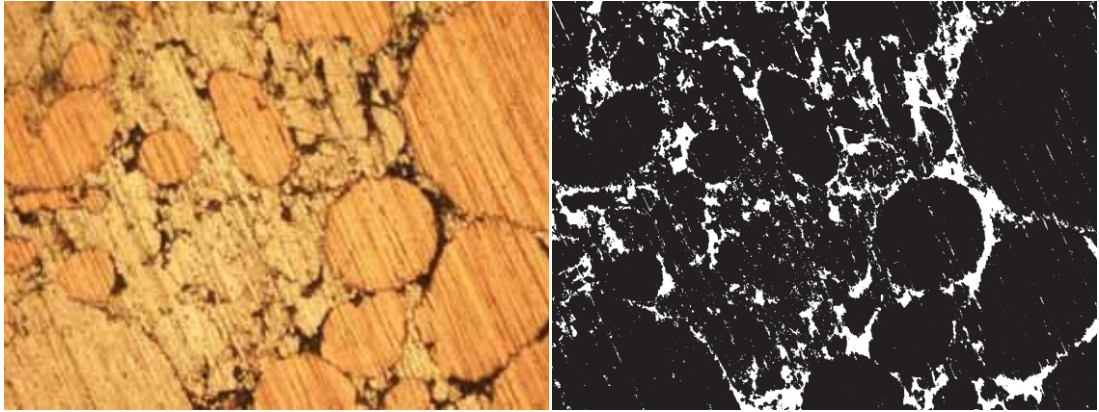
圖 4.23 NO.23 孔隙率為 10.335%



(a)

(b)

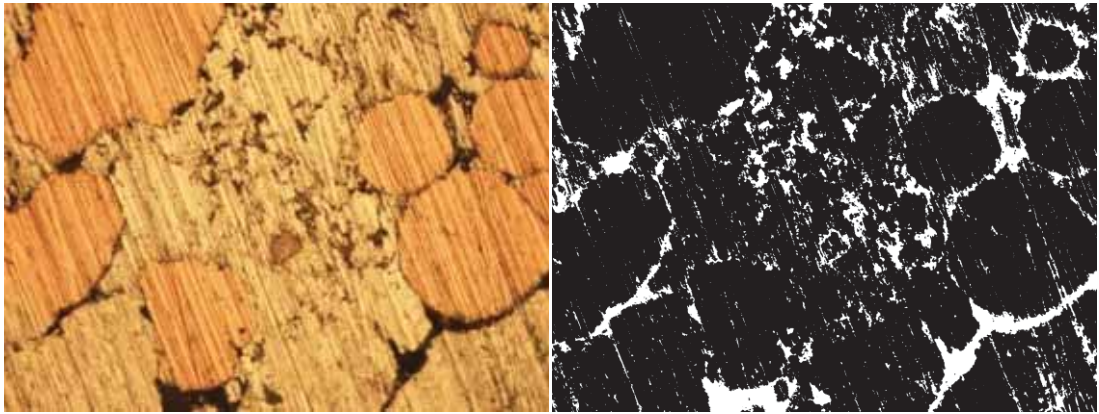
圖 4.24 NO.24 孔隙率為 4.566%



(a)

(b)

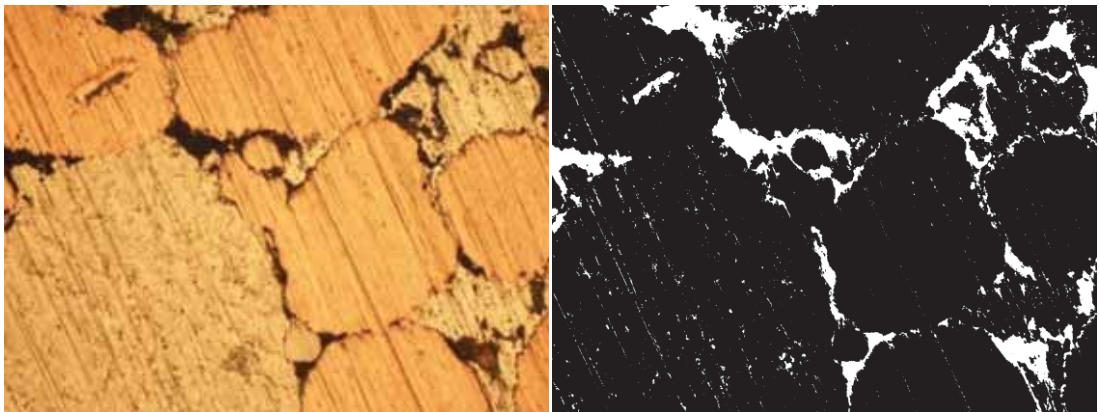
圖 4.25 NO.25 孔隙率為 12.171%



(a)

(b)

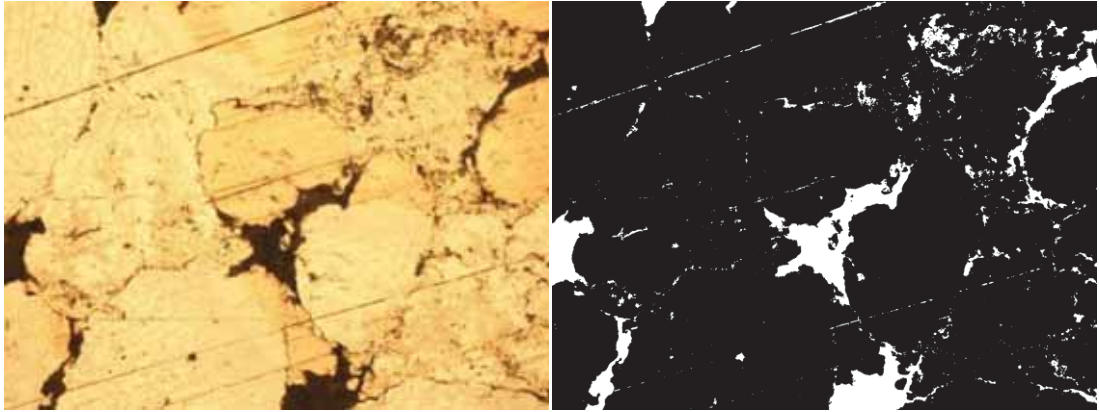
圖 4.26 NO.26 孔隙率為 12.551%



(a)

(b)

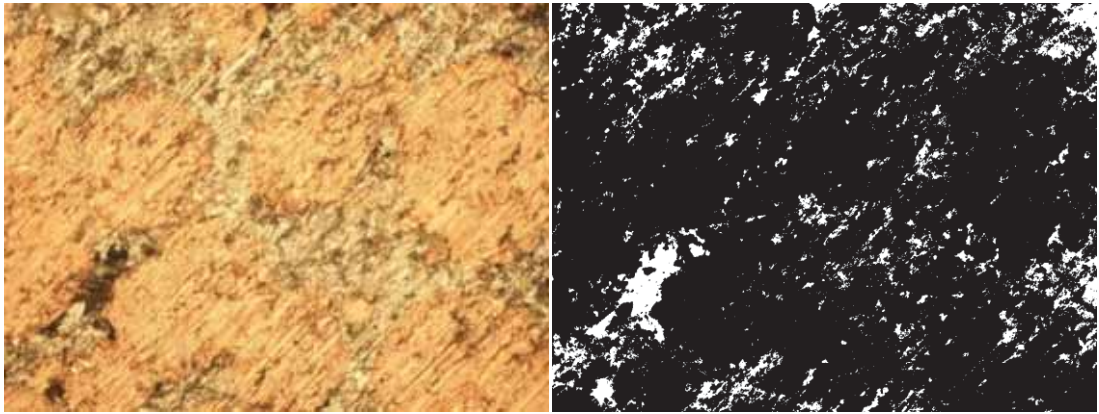
圖 4.27 NO.27 孔隙率為 9.351%



(a)

(b)

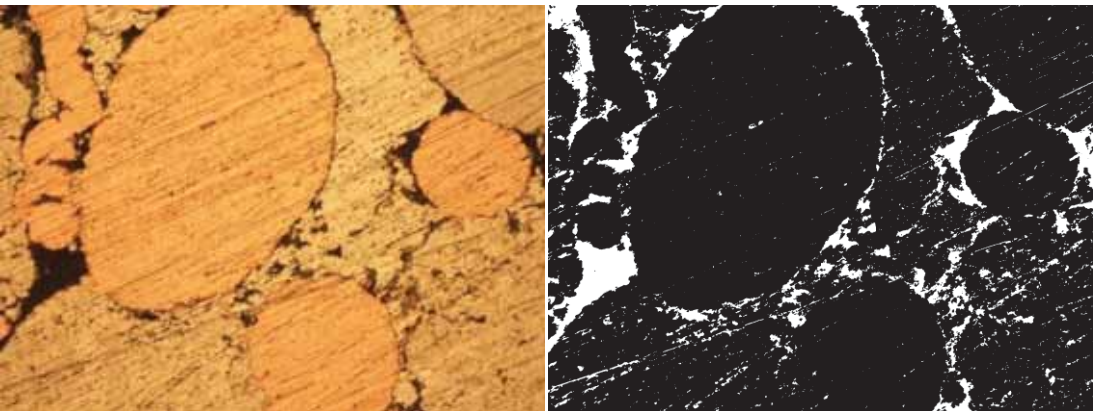
圖 4.28 NO.28 孔隙率為 7.439%



(a)

(b)

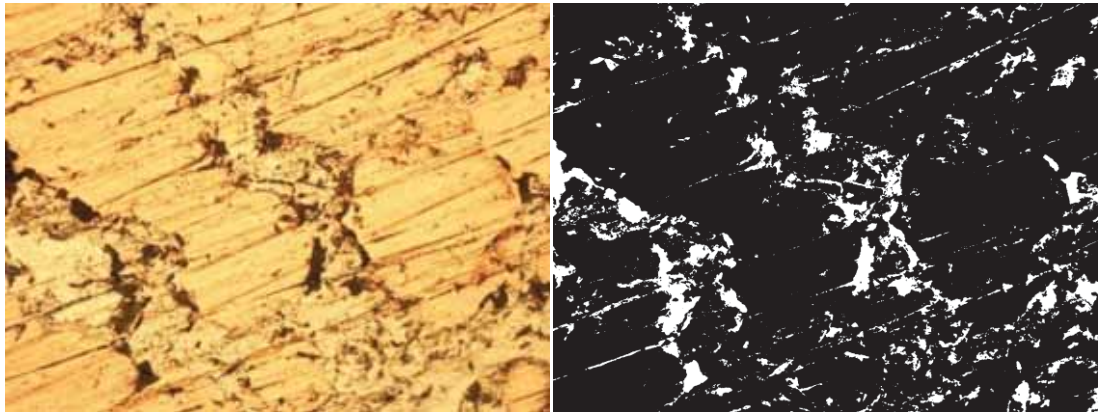
圖 4.29 NO.29 孔隙率為 9.42%



(a)

(b)

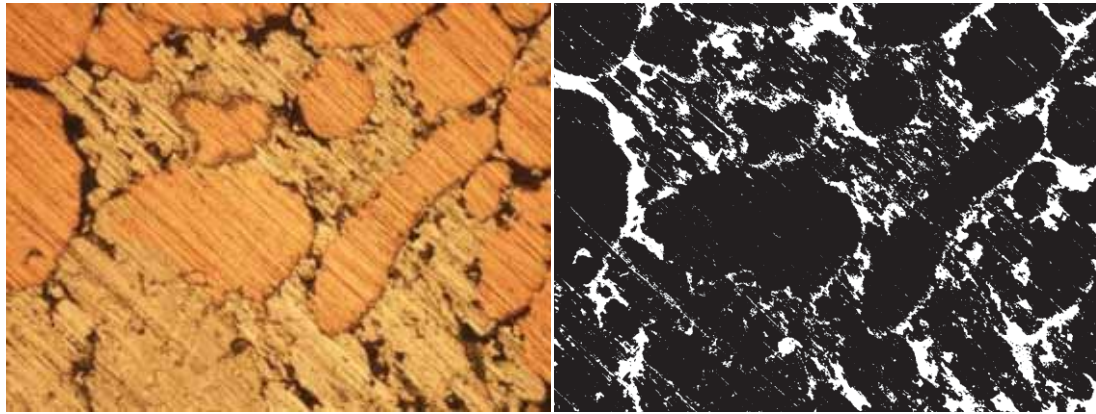
圖 4.30 NO.30 孔隙率為 9.607%



(a)

(b)

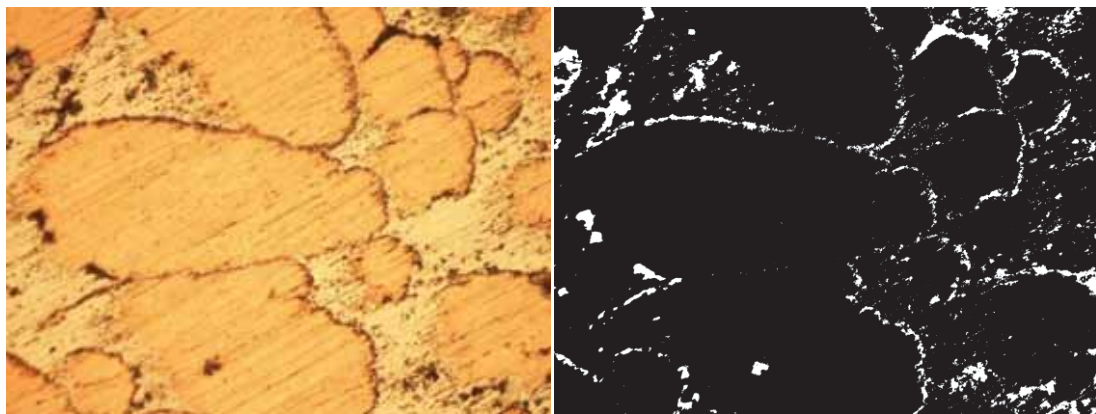
圖 4.31 NO.31 孔隙率為 10.175%



(a)

(b)

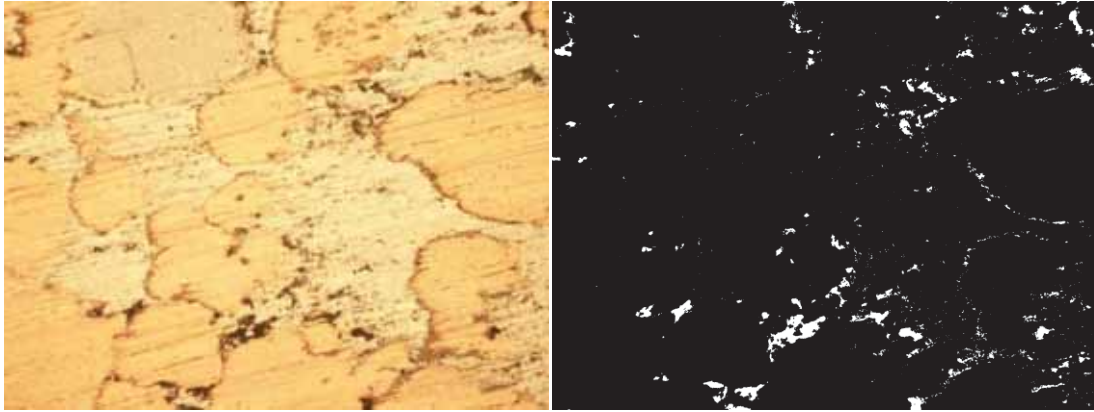
圖 4.32 NO.32 孔隙率為 15.637%



(a)

(b)

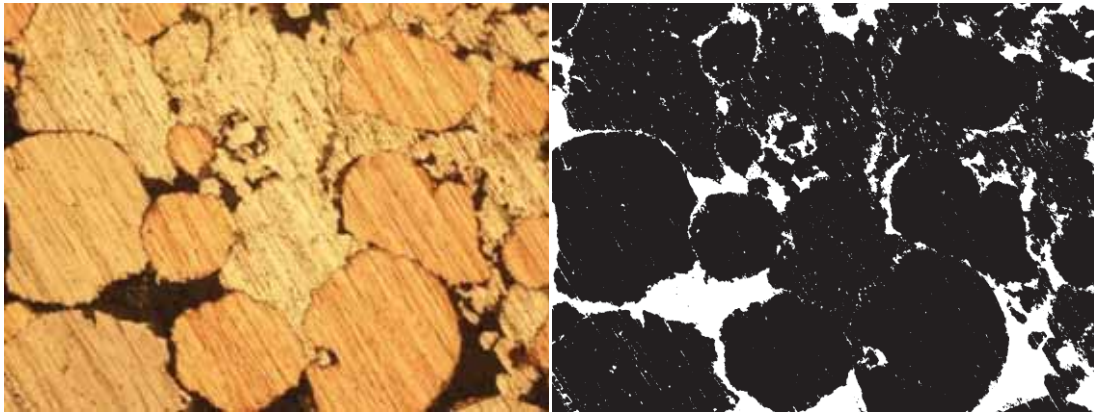
圖 4.33 NO.33 孔隙率為 5.377%



(a)

(b)

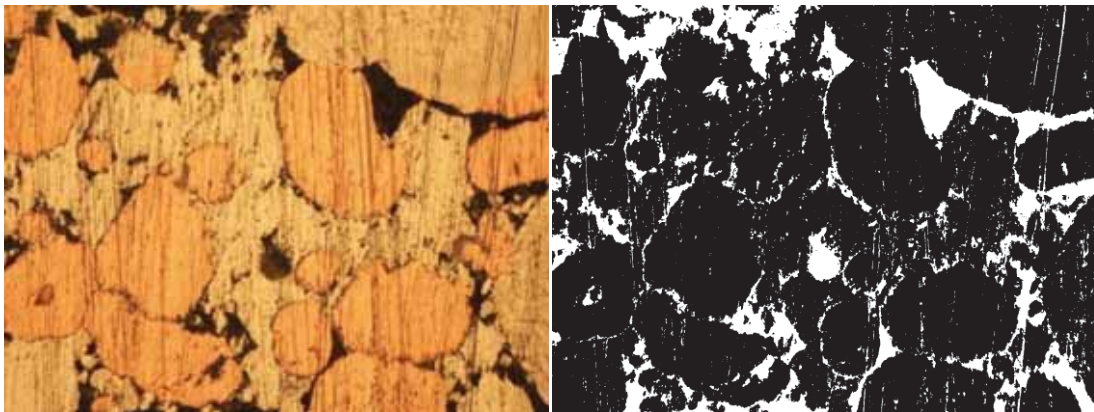
圖 4.34 NO.34 孔隙率為 2.554%



(a)

(b)

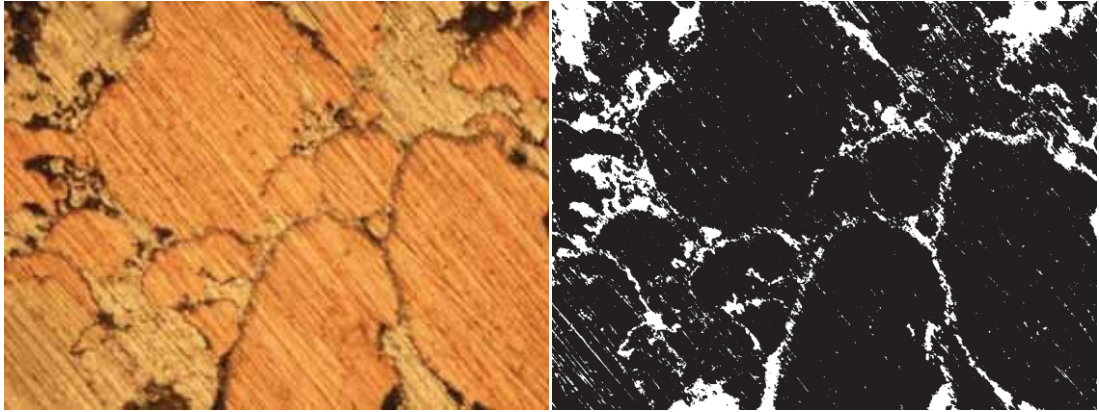
圖 4.35 NO.35 孔隙率為 14.028%



(a)

(b)

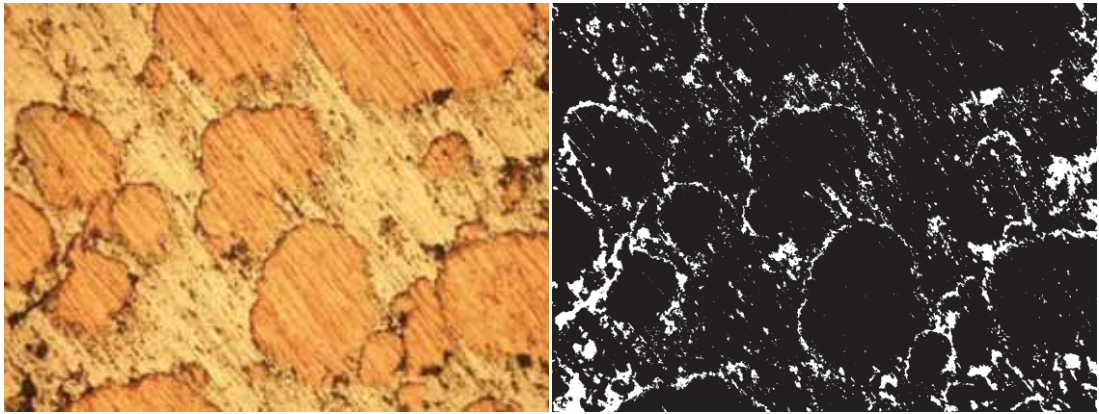
圖 4.36 NO.36 孔隙率為 16.539%



(a)

(b)

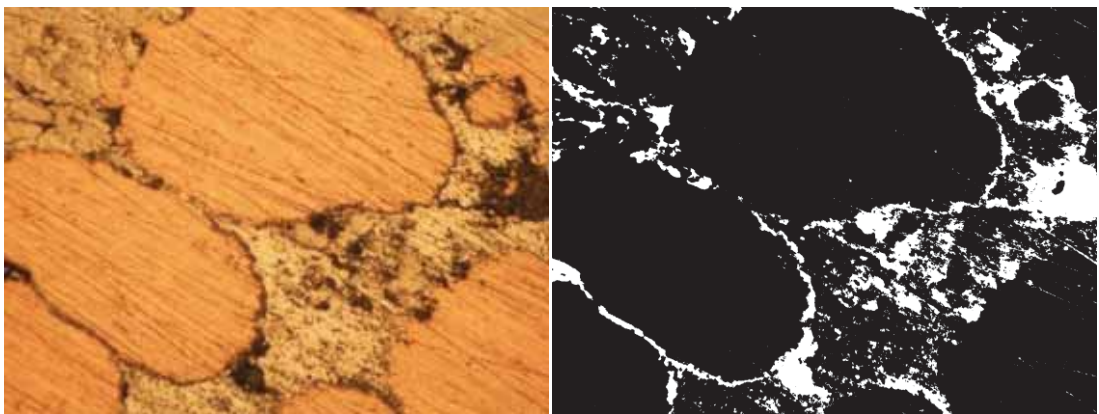
圖 4.37 NO.37 孔隙率為 11.892%



(a)

(b)

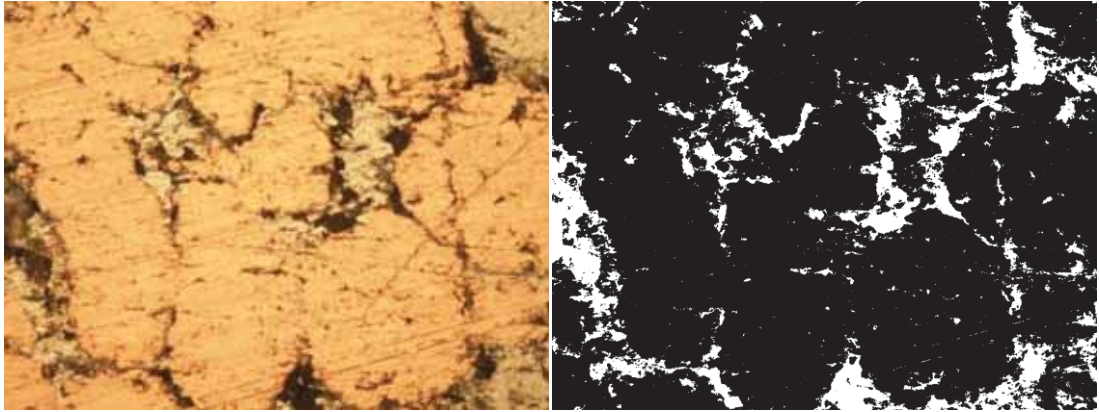
圖 4.38 NO.38 孔隙率為 9.459%



(a)

(b)

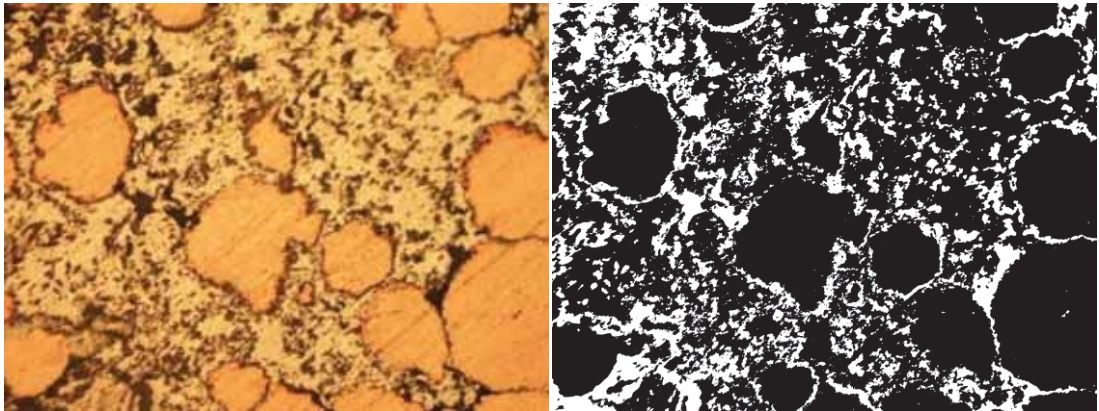
圖 4.39 NO.39 孔隙率為 11.742%



(a)

(b)

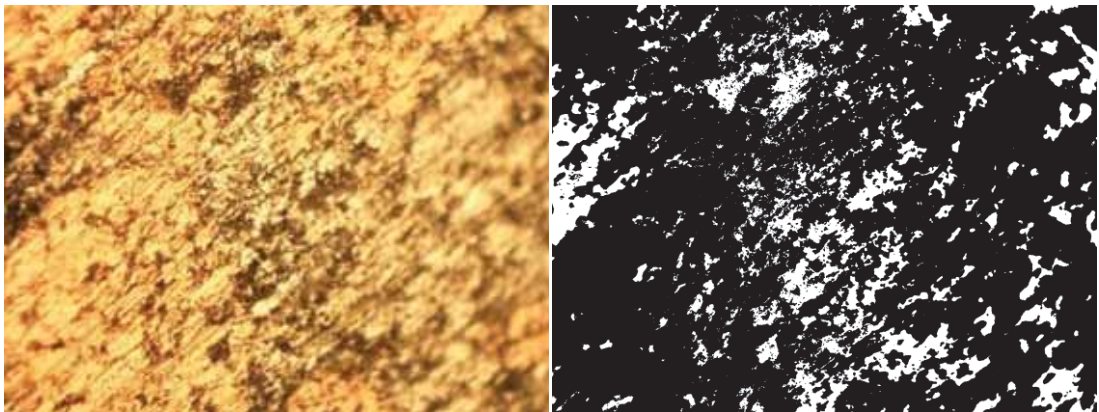
圖 4.40 NO.40 孔隙率為 13.365%



(a)

(b)

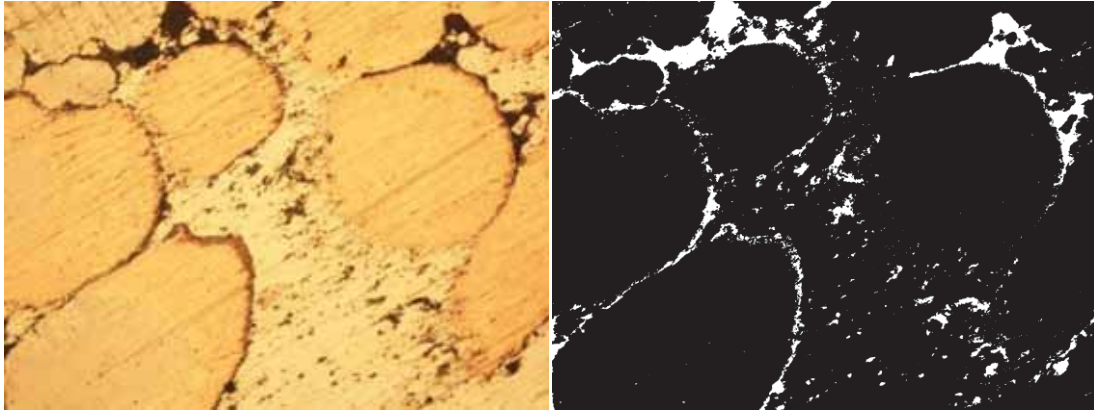
圖 4.41 NO.41 孔隙率為 23.345%



(a)

(b)

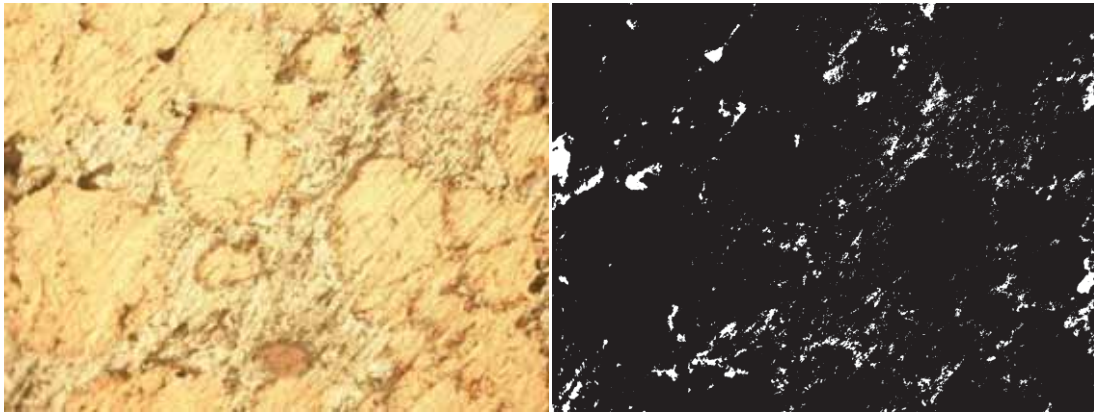
圖 4.42 NO.42 孔隙率為 16.787%



(a)

(b)

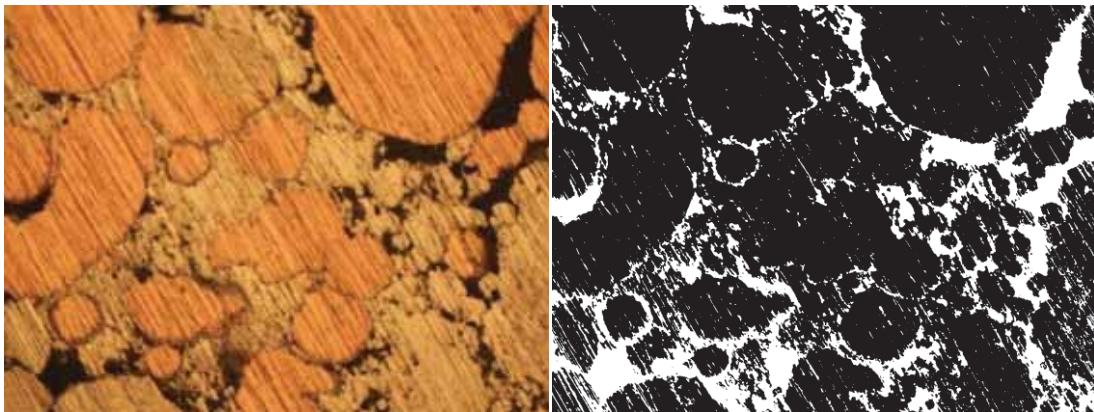
圖 4.43 NO.43 孔隙率為 5.941%



(a)

(b)

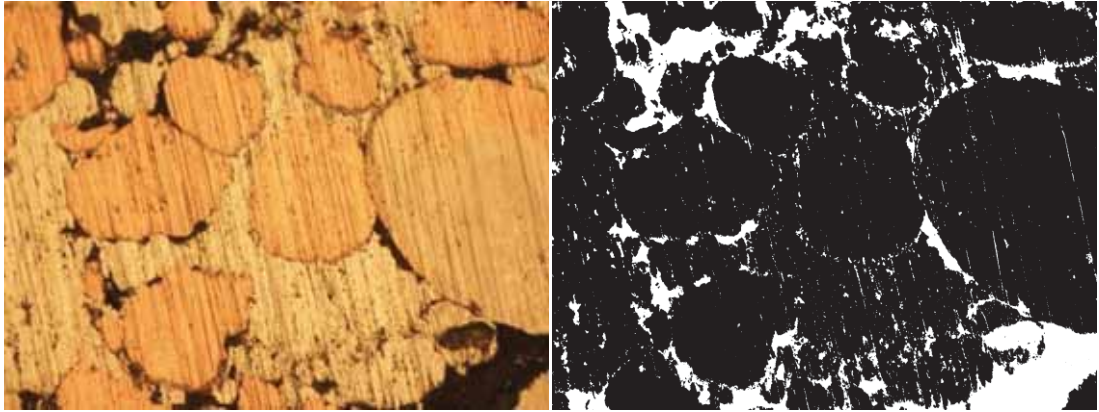
圖 4.44 NO.44 孔隙率為 4.106%



(a)

(b)

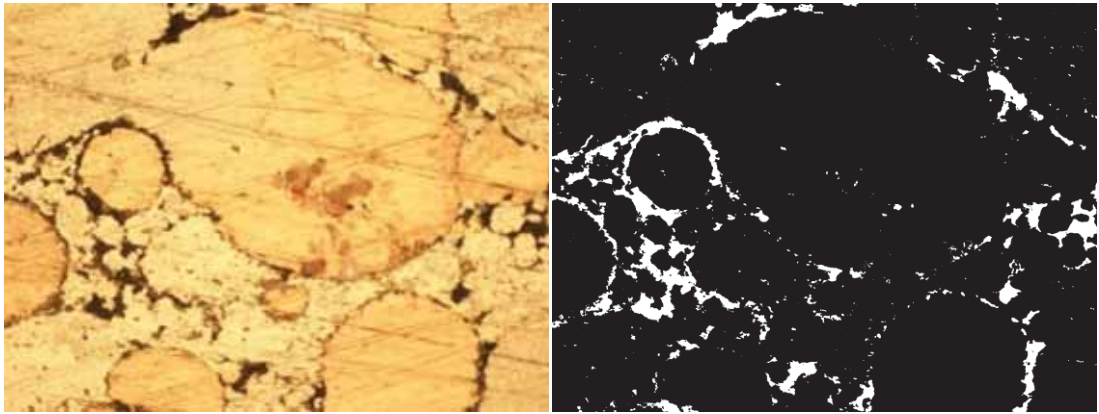
圖 4.45 NO.45 孔隙率為 21.313%



(a)

(b)

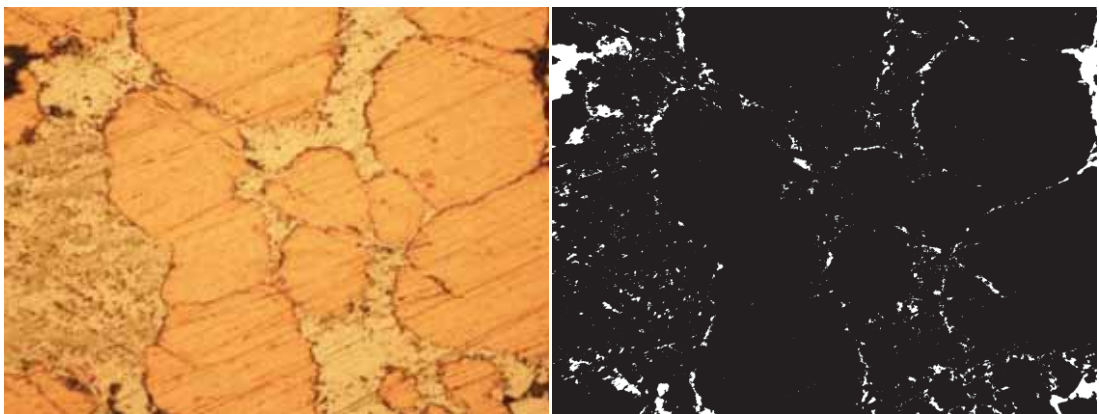
圖 4.46 NO.46 孔隙率為 14.58%



(a)

(b)

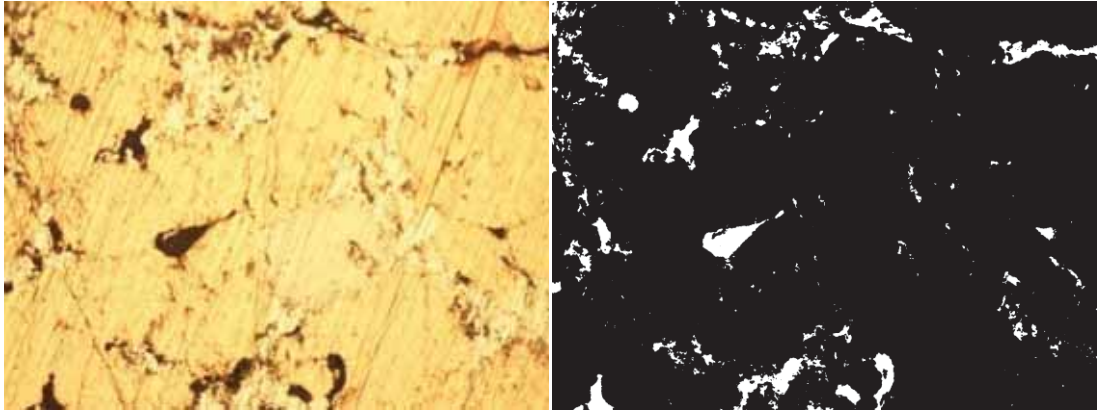
圖 4.47 NO.47 孔隙率為 6.568%



(a)

(b)

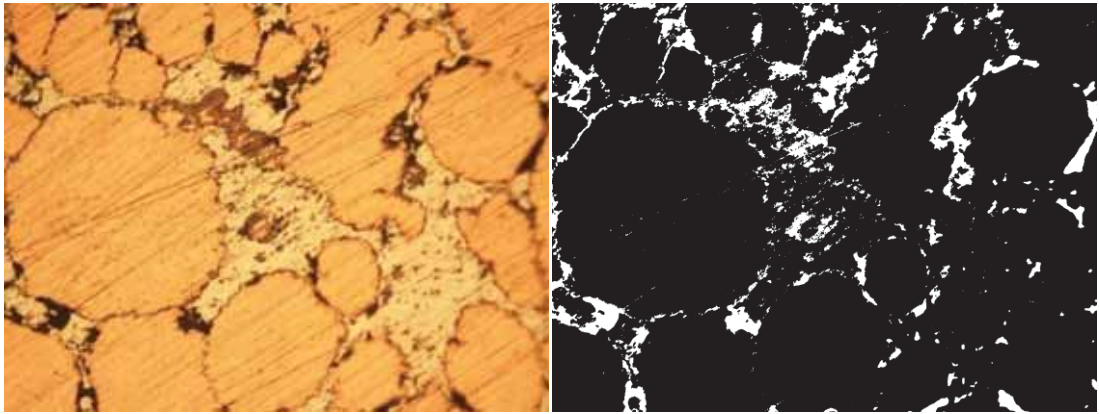
圖 4.48 NO.48 孔隙率為 3.902%



(a)

(b)

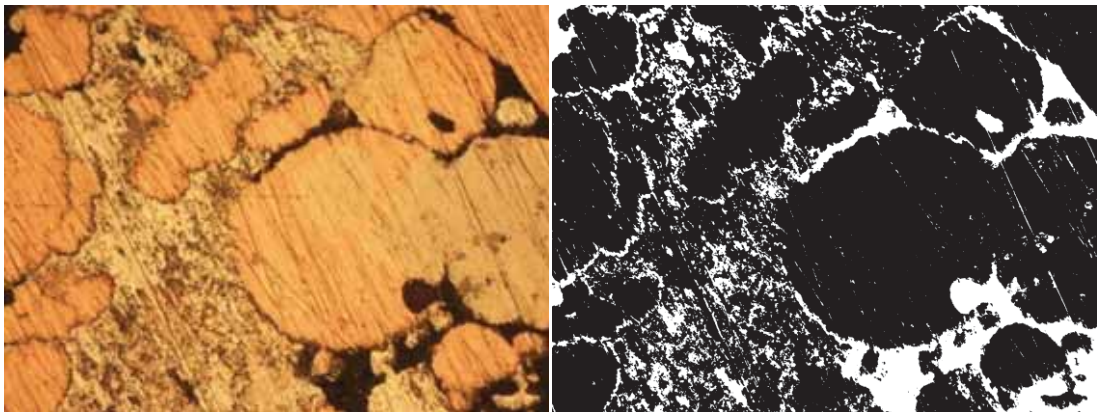
圖 4.49 NO.49 孔隙率為 5.131%



(a)

(b)

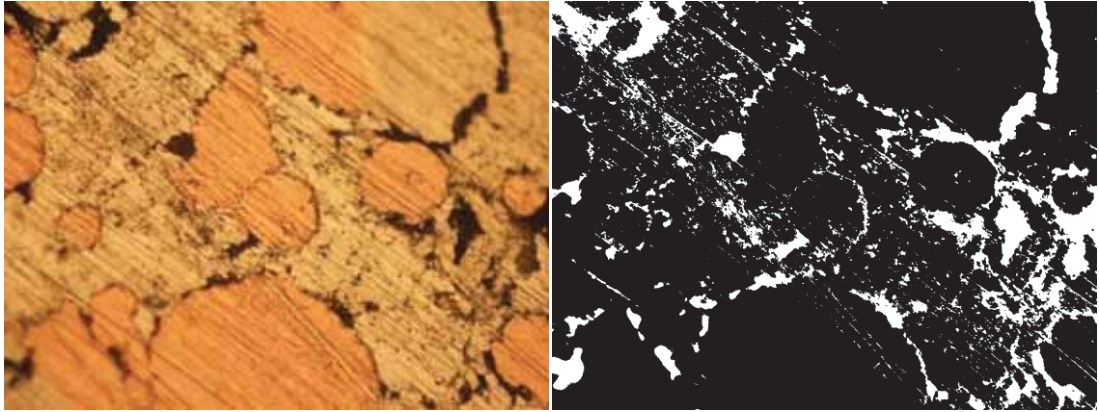
圖 4.50 NO.50 孔隙率為 8.091%



(a)

(b)

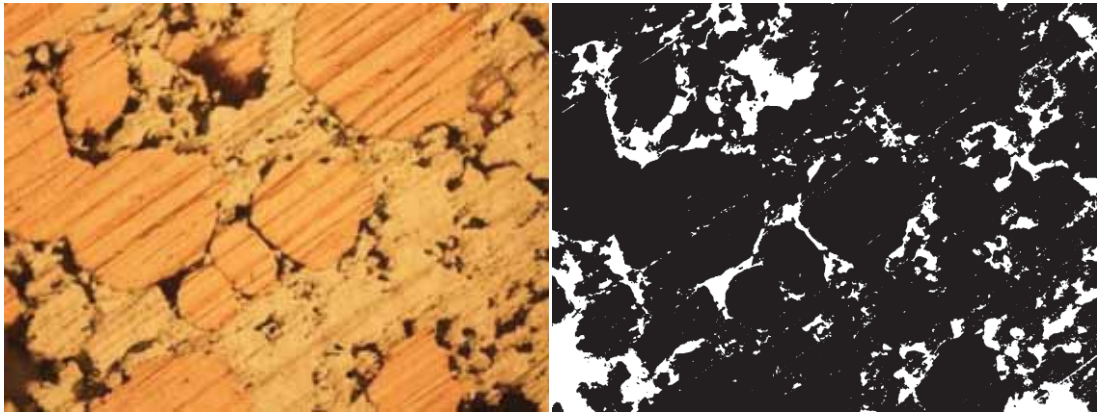
圖 4.51 NO.51 孔隙率為 18.44%



(a)

(b)

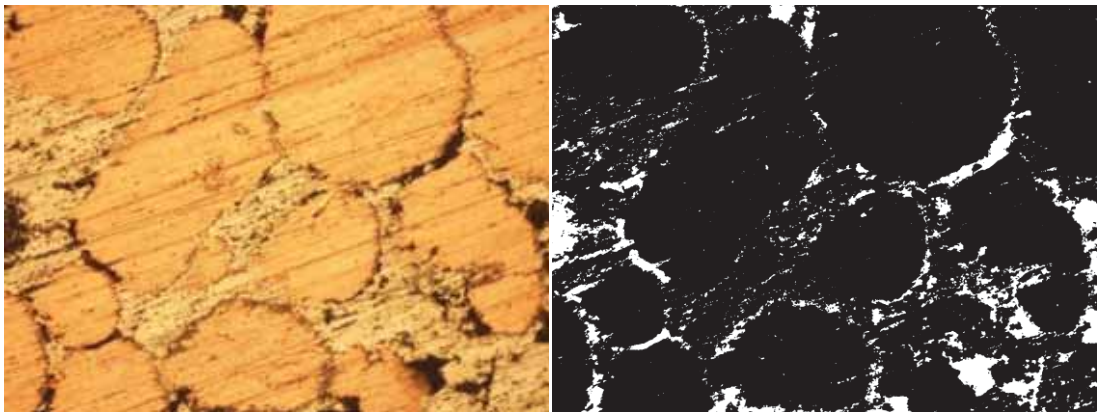
圖 4.52 NO.52 孔隙率為 13.909%



(a)

(b)

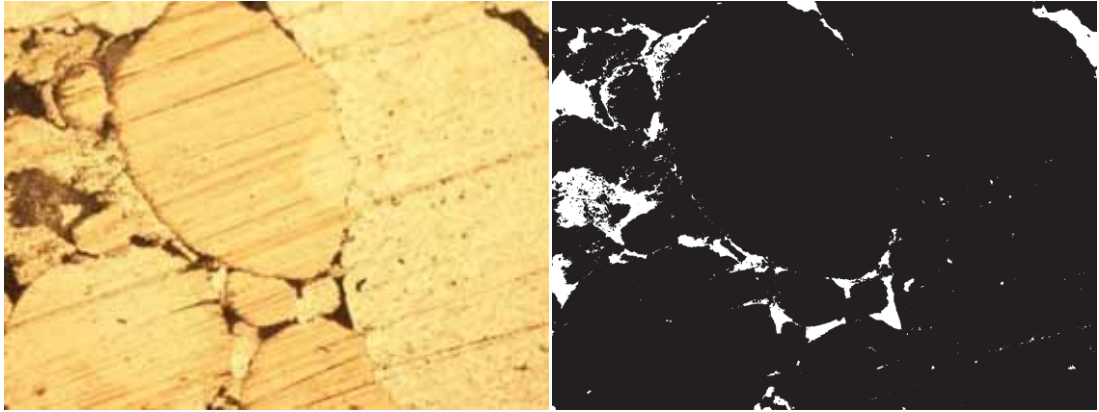
圖 4.53 NO.53 孔隙率為 14.602%



(a)

(b)

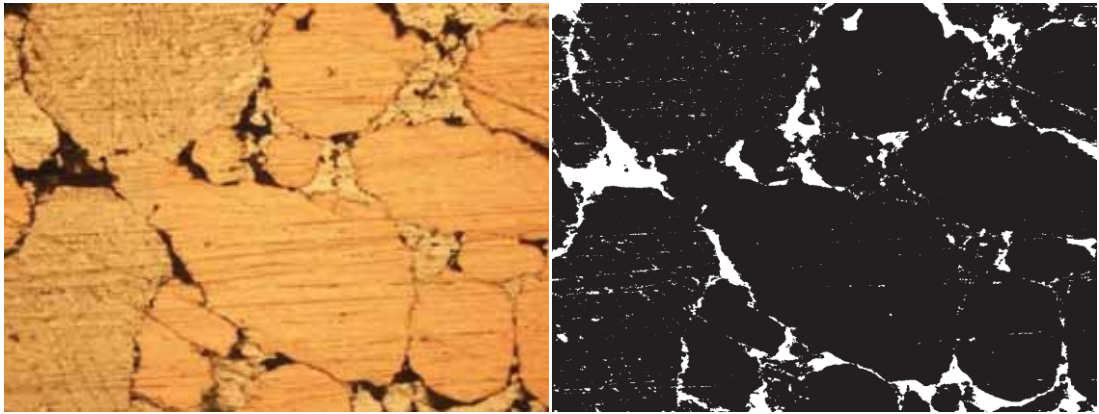
圖 4.54 NO.54 孔隙率為 8.68%



(a)

(b)

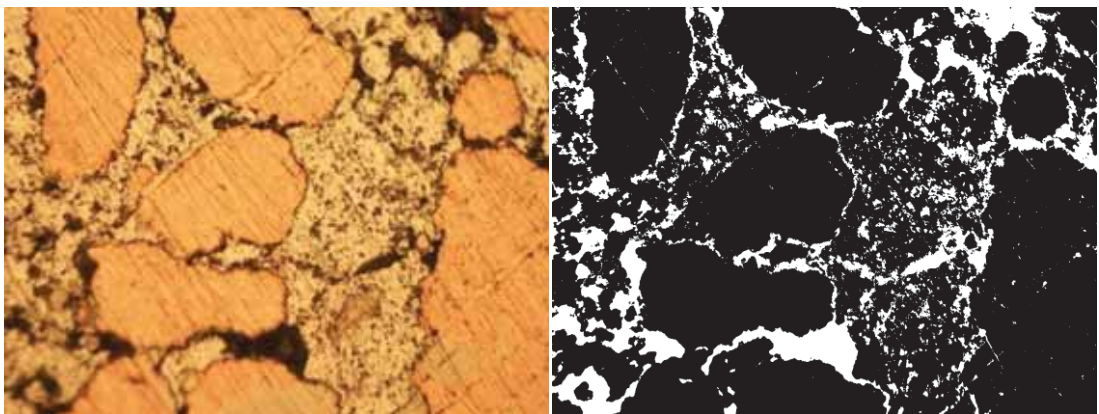
圖 4.55 NO.55 孔隙率為 6.038%



(a)

(b)

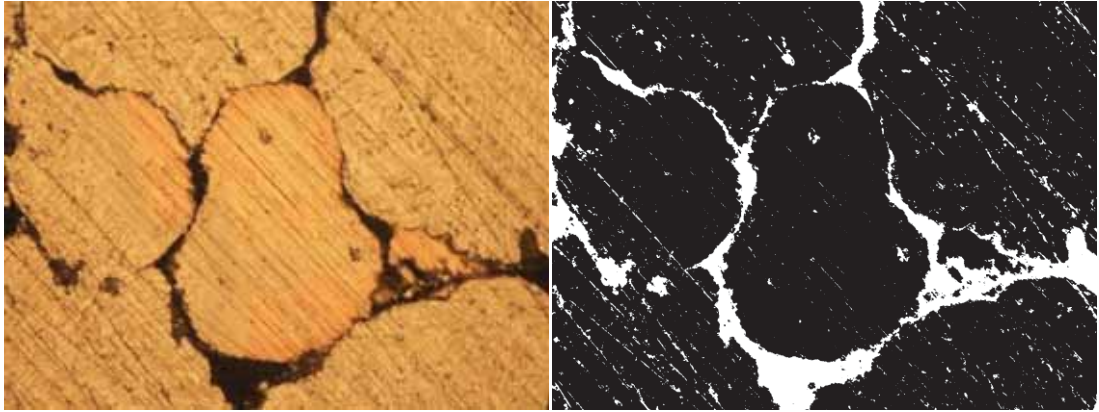
圖 4.56 NO.56 孔隙率為 8.476%



(a)

(b)

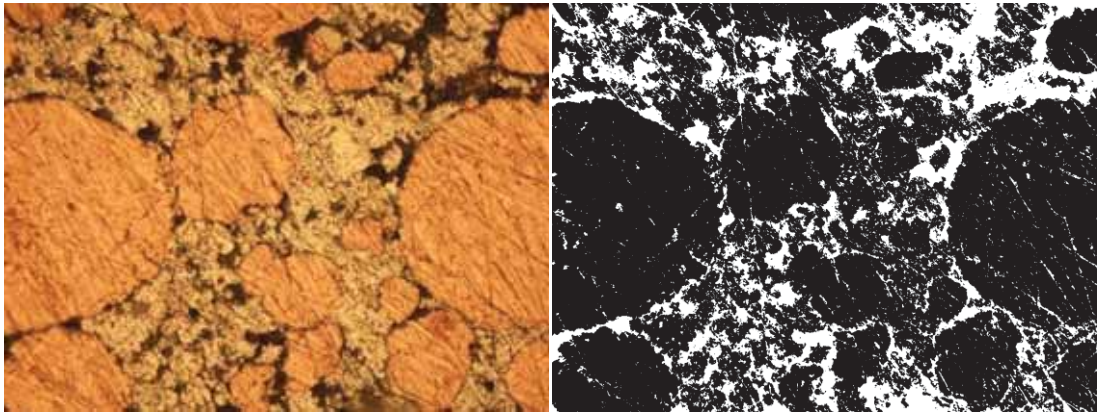
圖 4.57 NO.57 孔隙率為 17.09%



(a)

(b)

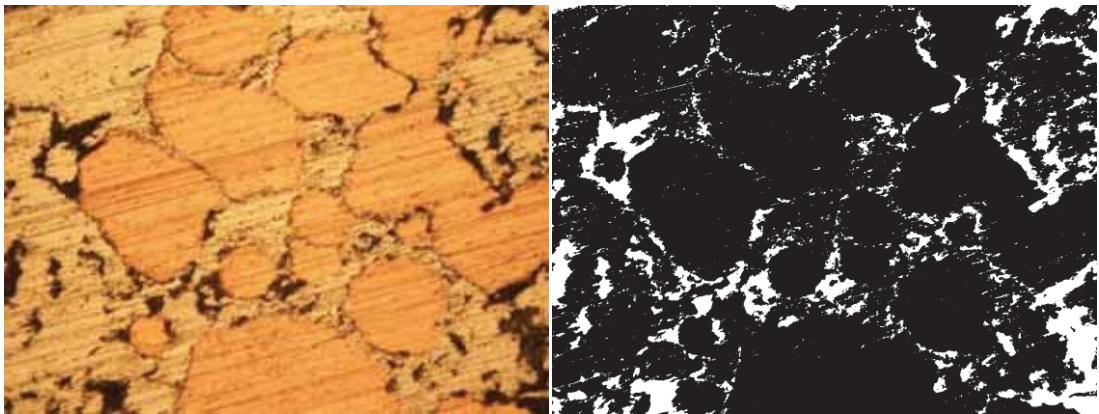
圖 4.58 NO.58 孔隙率為 11.534%



(a)

(b)

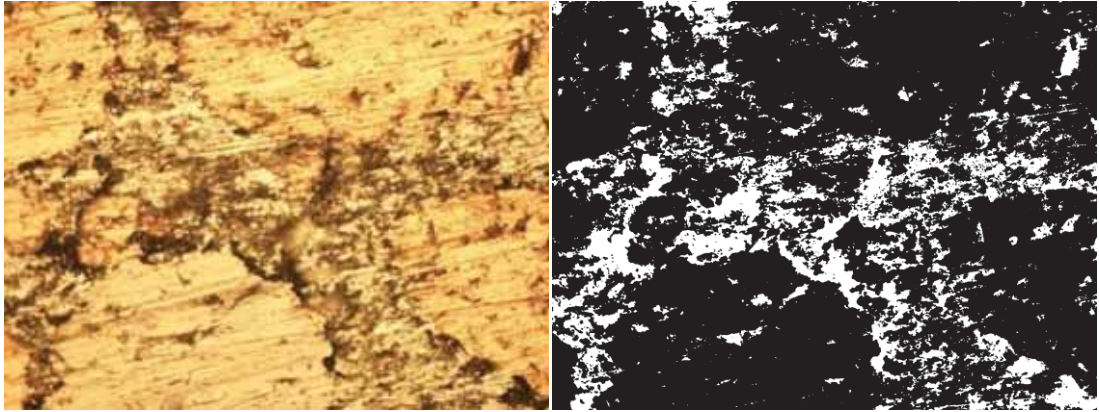
圖 4.59 NO.59 孔隙率為 22.221%



(a)

(b)

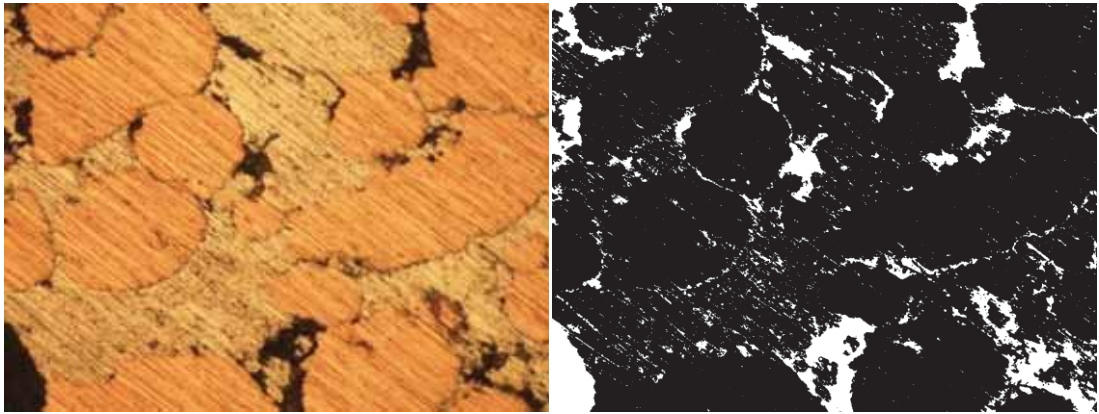
圖 4.60 NO.60 孔隙率為 13.056%



(a)

(b)

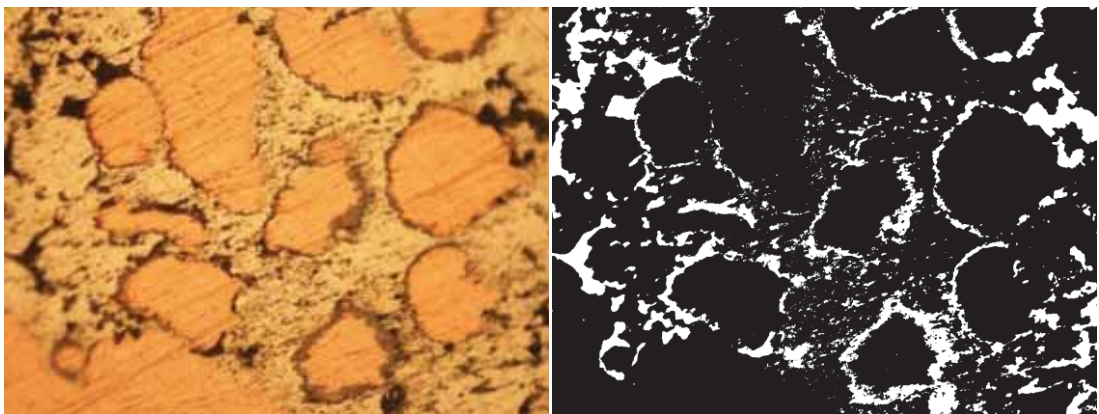
圖 4.61 NO.61 孔隙率為 18.942%



(a)

(b)

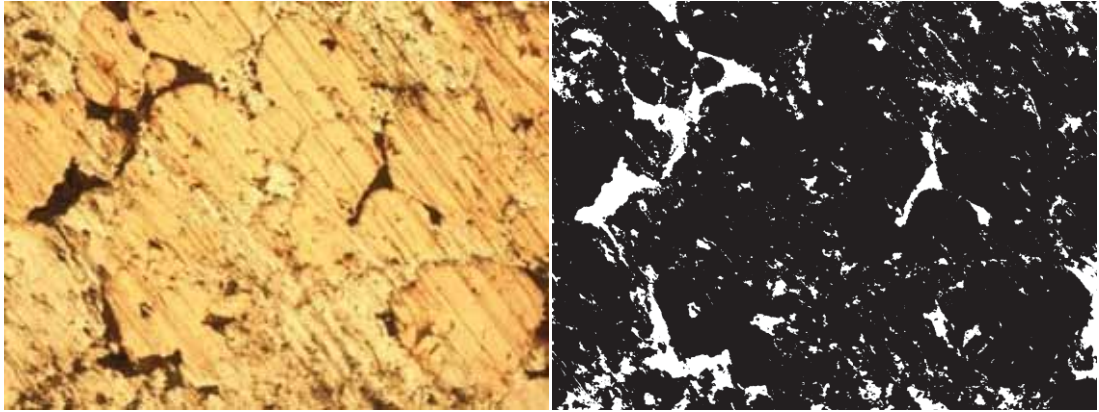
圖 4.62 NO.62 孔隙率為 7.596%



(a)

(b)

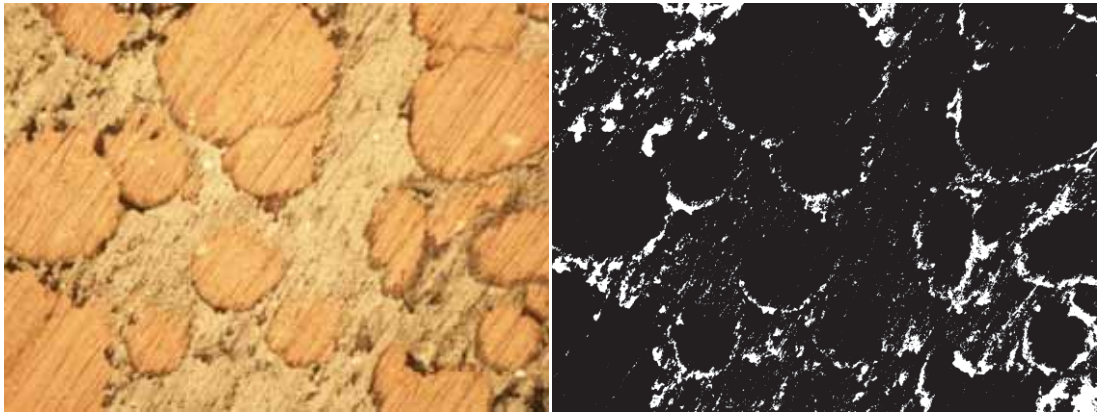
圖 4.63 NO.63 孔隙率為 14.17%



(a)

(b)

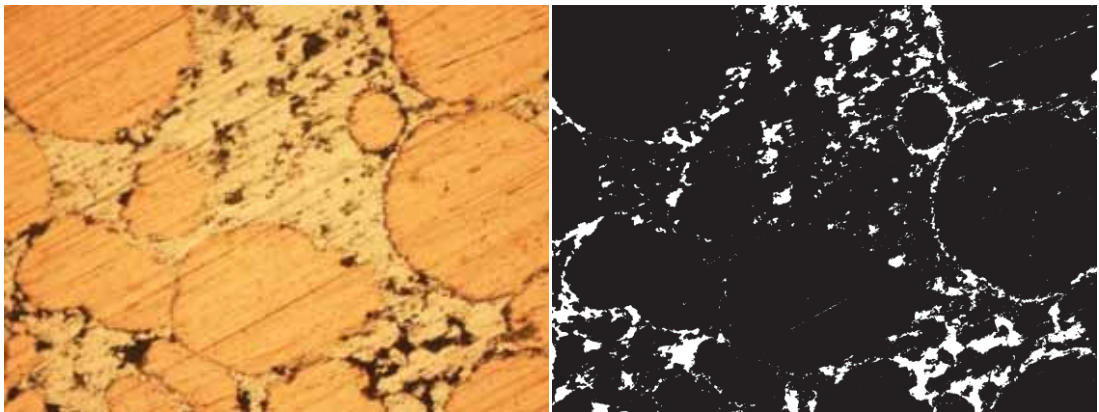
圖 4.64 NO.64 孔隙率為 11.145%



(a)

(b)

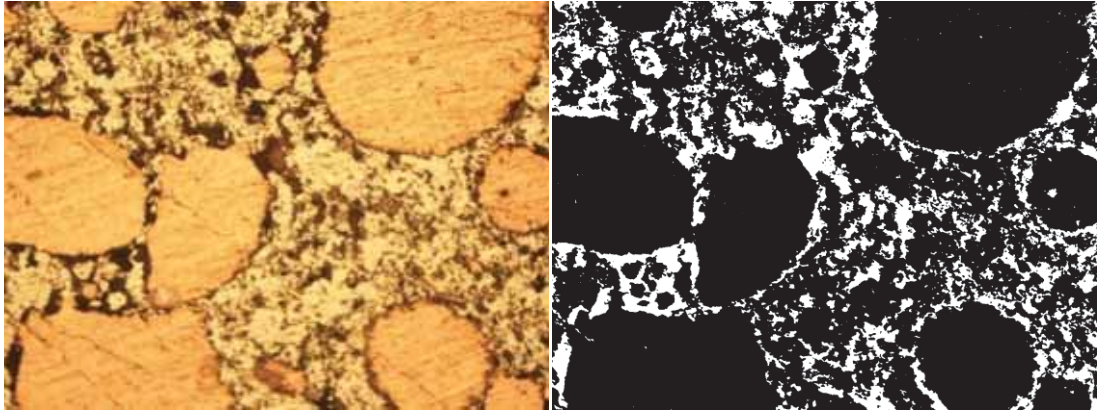
圖 4.65 NO.65 孔隙率為 8.092%



(a)

(b)

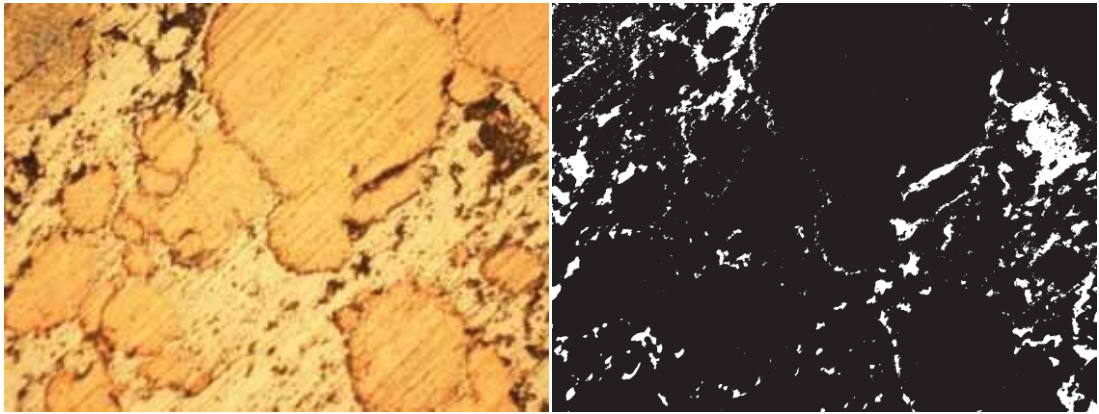
圖 4.66 NO.66 孔隙率為 8.396%



(a)

(b)

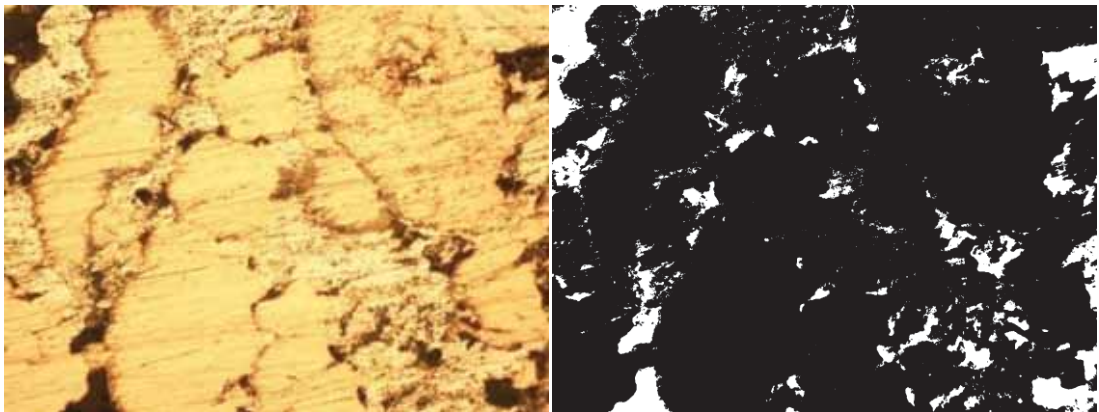
圖 4.67 NO.67 孔隙率為 19.071%



(a)

(b)

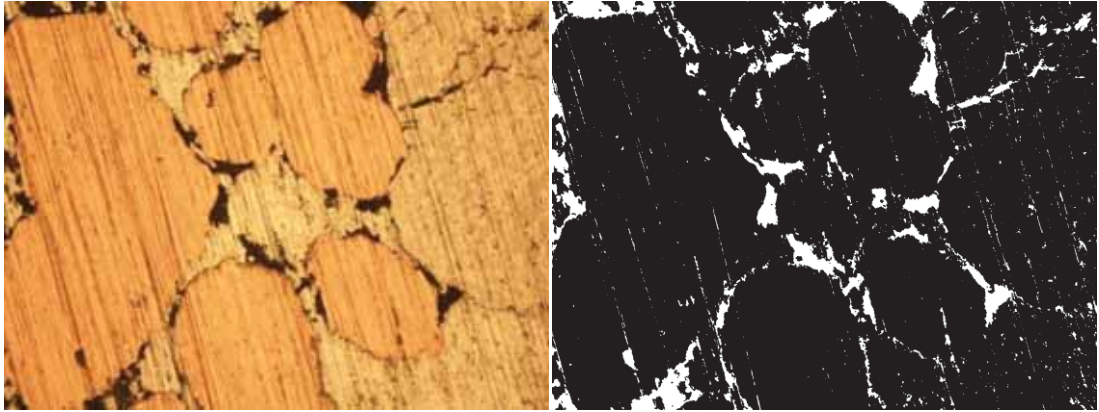
圖 4.68 NO.68 孔隙率為 8.249%



(a)

(b)

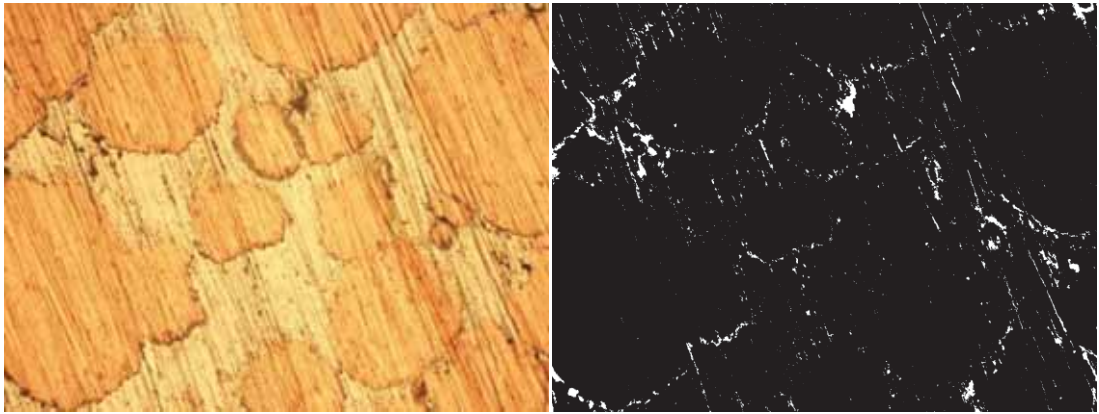
圖 4.69 NO.69 孔隙率為 9.255%



(a)

(b)

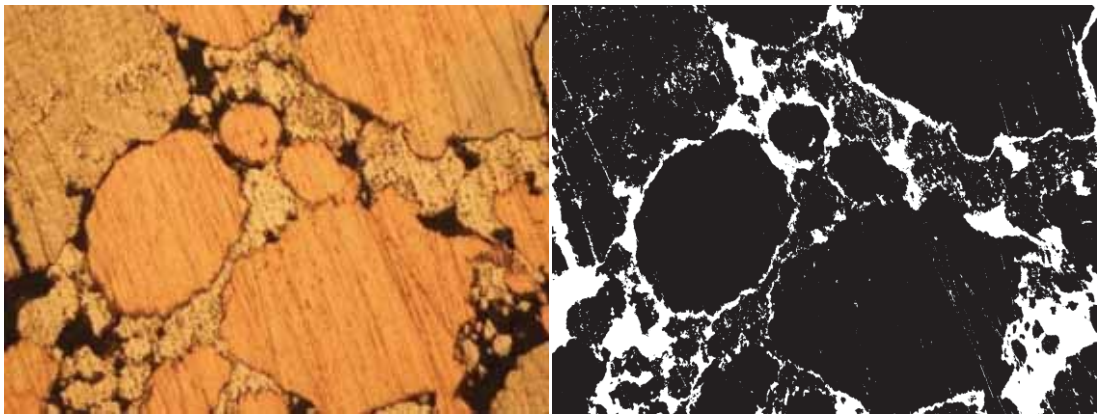
圖 4.70 NO.70 孔隙率為 8.396%



(a)

(b)

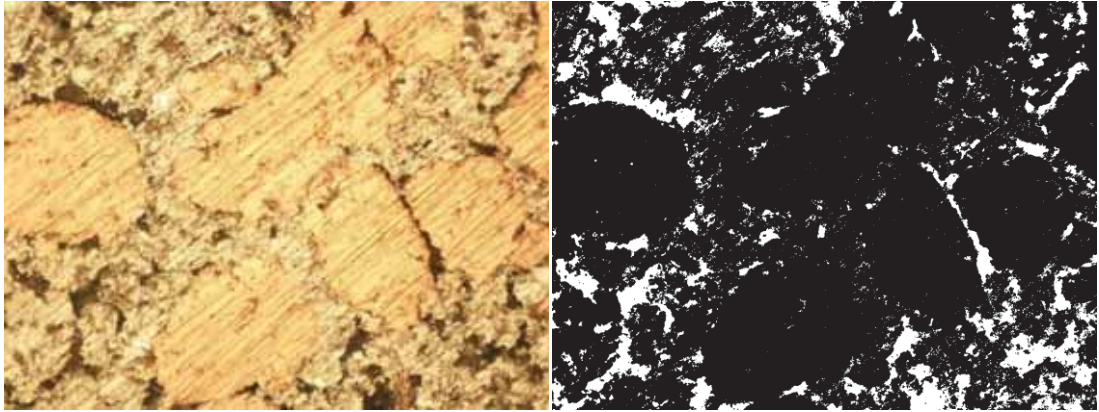
圖 4.71 NO.71 孔隙率為 2.378%



(a)

(b)

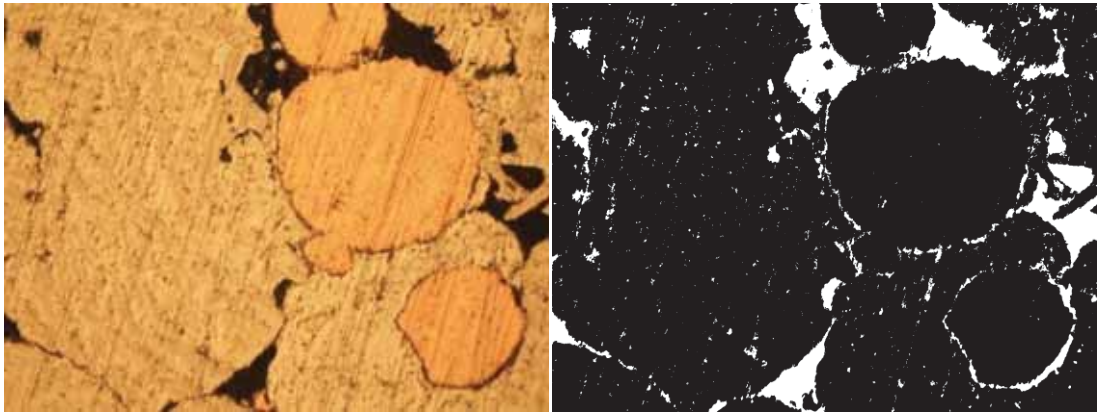
圖 4.72 NO.72 孔隙率為 16.512%



(a)

(b)

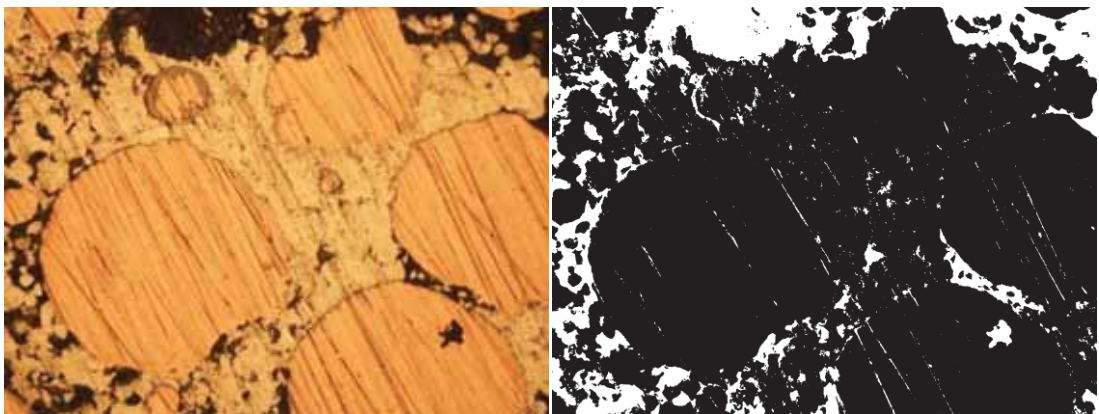
圖 4.73 NO.73 孔隙率為 12.422%



(a)

(b)

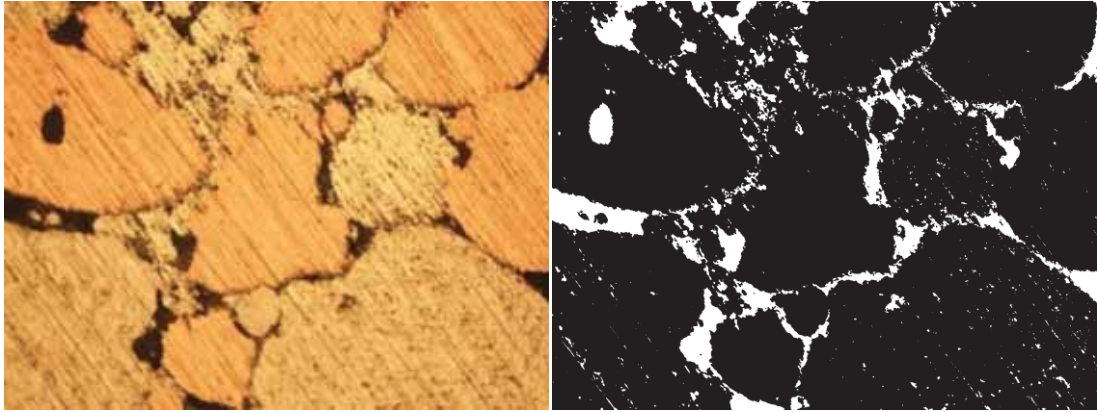
圖 4.74 NO.74 孔隙率為 9.337%



(a)

(b)

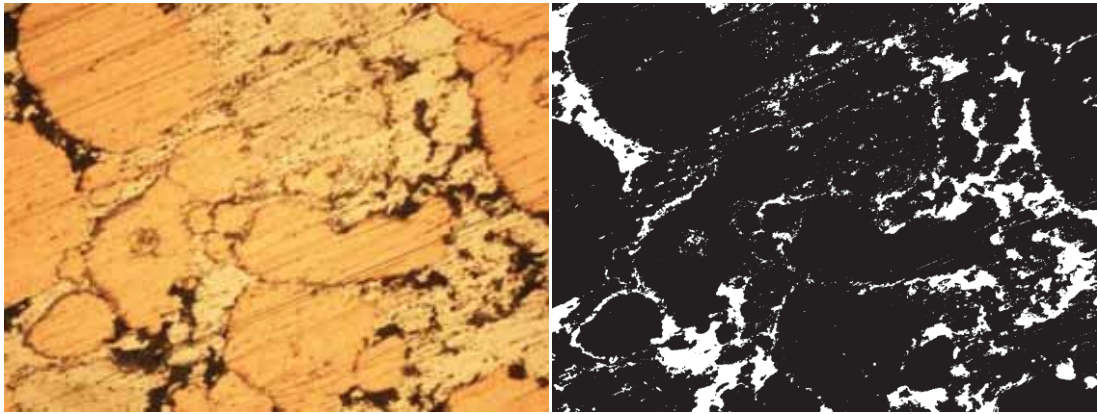
圖 4.75 NO.75 孔隙率為 15.702%



(a)

(b)

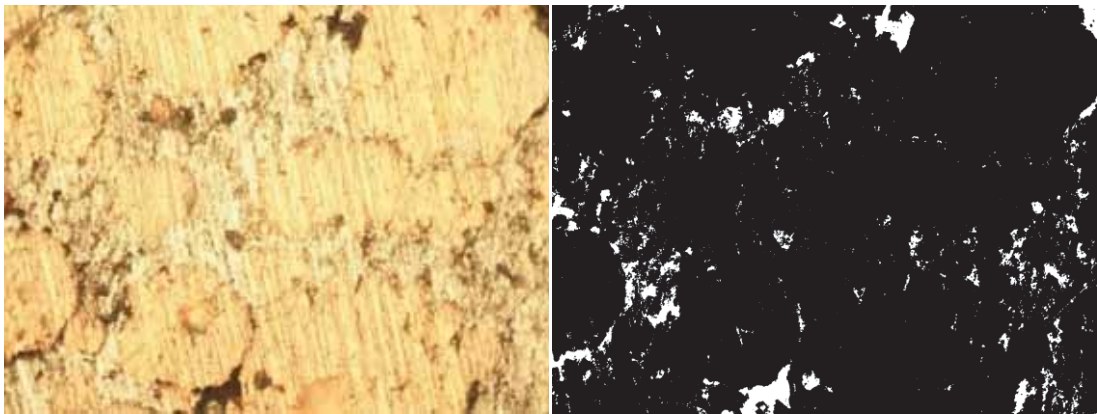
圖 4.76 NO.76 孔隙率為 9.899%



(a)

(b)

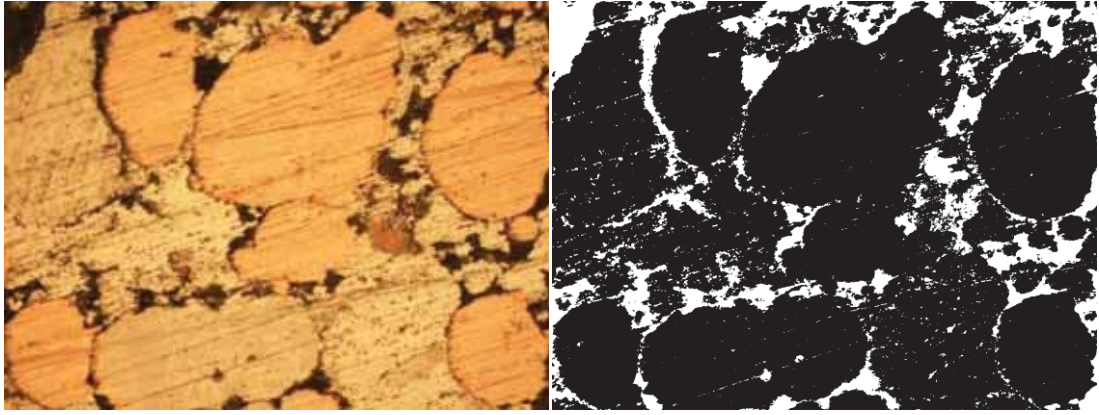
圖 4.77 NO.77 孔隙率為 12.495%



(a)

(b)

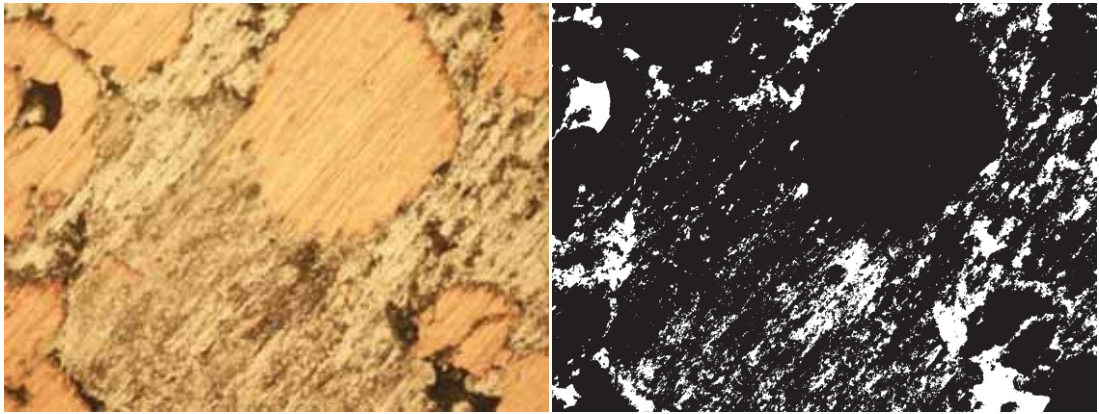
圖 4.78 NO.78 孔隙率為 4.991%



(a)

(b)

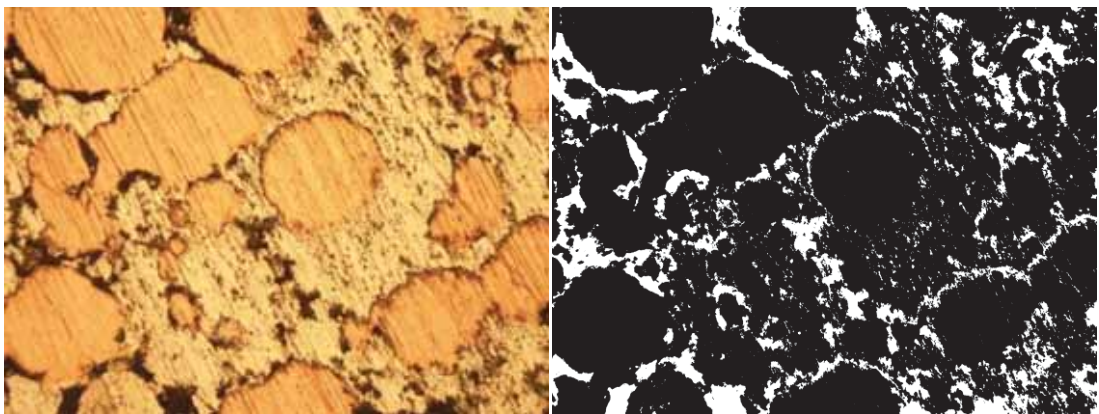
圖 4.79 NO.79 孔隙率為 16.17%



(a)

(b)

圖 4.80 NO.80 孔隙率為 14.678%



(a)

(b)

圖 4.81 NO.81 孔隙率為 15.153%

4.2 分析與檢驗

獲得各個實驗參數的孔隙率數據後，實驗數據會透過 Design-Expert 系統計算實驗的變異數分析、常態檢定、殘差與實驗順序檢驗、適配值檢驗、離群值檢驗等程序，再從中推論出製程最佳化參數組合。

4.2.1 變異數分析

變異數分析首要目的是評估整體的實驗誤差如表 4.2 所示，本實驗選定因子用 A、B、C 表示，A 為雷射強度(Laser Power)、B 為燒結速度(Speed)、C 為雷射頻率(Frequency)，藉由 P 值可發現主效應因子 B、C、AC、ABC 的 P 值小於 0.05，表示 B、C、AC、ABC 這些因子對於孔隙率係顯著的。

表 4.2 孔隙率變異數分析結果

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Block	7.18	2	3.59		
Model	1184.60	26	45.56	3.06	0.0003
A	22.01	2	11.00	0.74	0.4820
B	94.02	2	47.01	3.16	0.0496
C	165.23	2	82.62	5.56	0.0065
AB	82.04	4	20.51	1.38	0.2538
AC	472.82	4	118.20	7.95	<0.0001
BC	92.11	4	23.03	1.55	0.2019
ABC	256.37	8	32.05	2.16	0.0466
Residual	773.09	52	14.87		
Cor Total	1964.87	80			

4.2.2 殘差與實驗順序檢驗

殘差依實驗順序蒐集資料並繪製成圖表有助於發覺殘差間的相關性，當有一連串的正與負的殘差時就代表正相關與負相關，這表示著誤差的獨立假設已經被違反。由圖 4.82 所示，標準化殘差呈現正負亂數分佈且無顯示一連串的正與負的殘差趨勢，殘差值的標準範圍在 ± 3 之間，如果殘差值超過 ± 3 則必須剔除此數據，另外從圖中可知殘差值呈現無規則的亂數排列，沒有規律性的不正常變化。

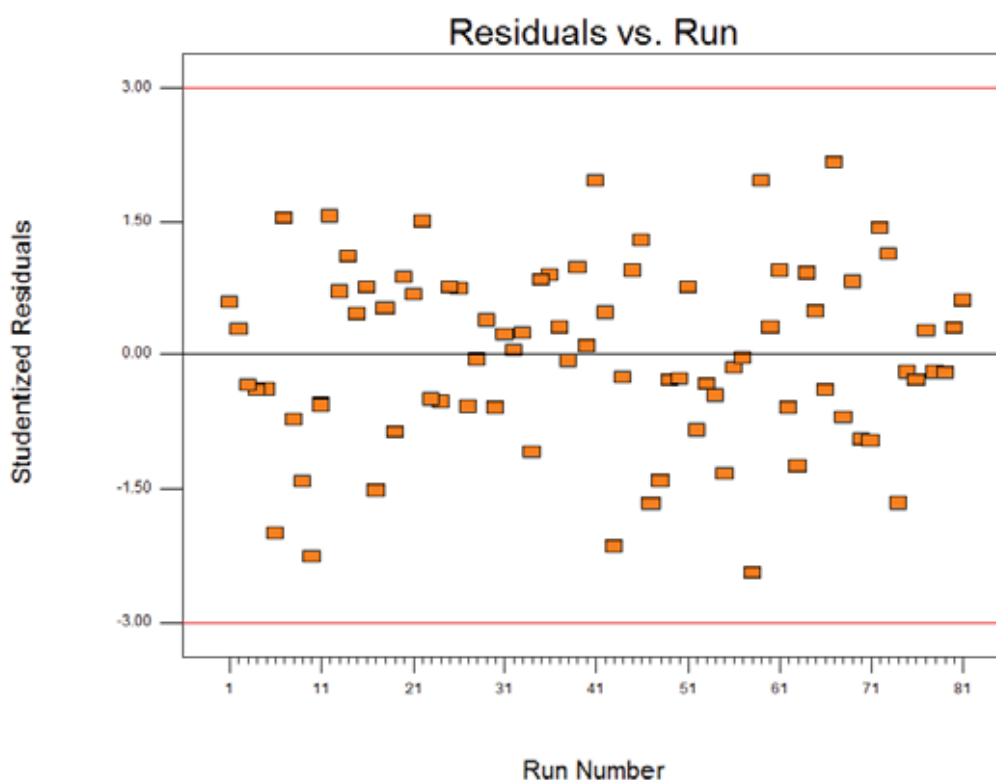


圖 4.82 孔隙率之殘差與實驗順序檢驗圖

4.2.3 常態檢定

圖 4.83 為殘差常態機率圖，圖中主要排列方式為殘差值由小至大依序排列，假如殘差為常態分配，圖形應呈現出一條直線趨向，其中斜線為 P 值斜率，由圖可知 P 值皆大於顯著水準 0.05，故本實驗為常態分配。

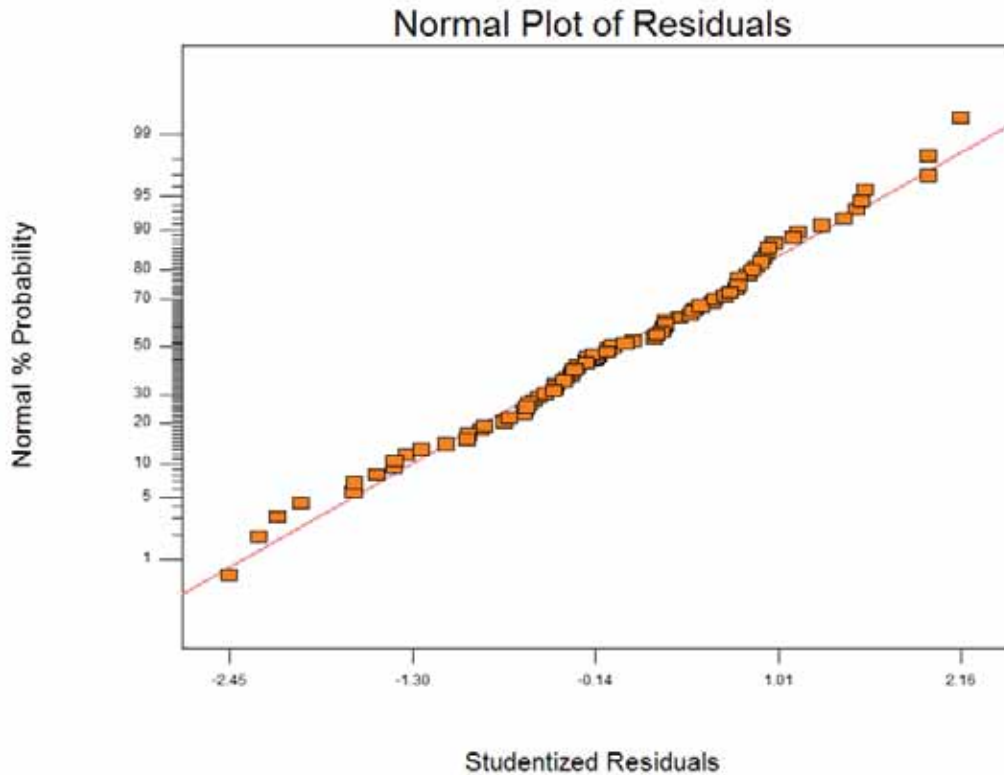


圖 4.83 殘差常態機率圖

4.2.4 離群值檢驗

當一個實驗的殘差超出其他的殘差許多，產生一個極大的誤差，我們稱之為離群值。當出現一個或多個離群值會改變變異數分析，所以發現一個離群值時，就必須仔細檢查。簡易的檢查離群值的方法是經由標準化殘差(d_{ij})的檢查，如式 4.1，若誤差項 e_{ij} 為 $N(0, \sigma^2)$ ，則標準化殘差應該接近標準常態：

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MSE}} \quad (4.1)$$

因此，標準化殘差(Studentizes Residual)的範圍應介於 ± 3.5 倍之間，若一個大於 ± 3.5 倍的標準化殘差極可能為一個離群值。由圖 4.84 所示，標準化殘差介於 ± 3.5 倍之區間，證明本實驗並無明顯的離群值。

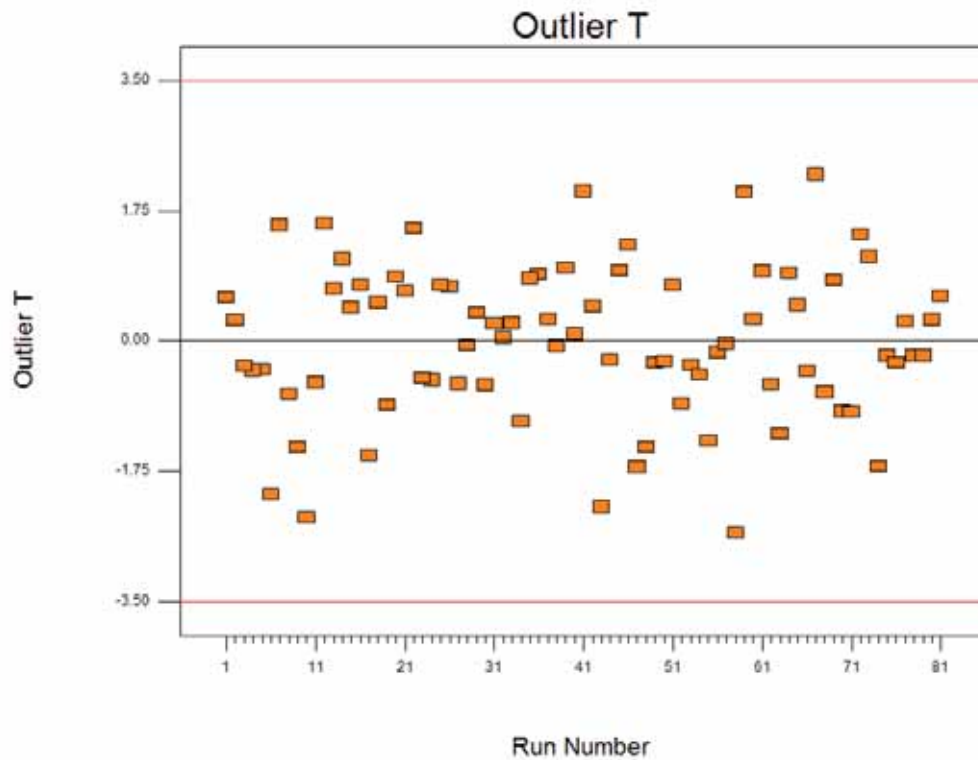


圖 4.84 實驗順序之離群值檢驗圖

4.2.5 適配值檢驗

假設模型正確且所有假設都成立，則殘差是沒有趨勢的；殘差應該與任何變數，包含所預測的輸出品質特性是沒有相關的。一個簡易的檢驗即是繪製出殘差相對於適配值的圖形，圖形中不應該呈現明顯趨勢的形狀；由圖 4.85 所示，本研究標準化殘差呈現正負亂數分佈，證明殘差與預測值沒有明顯的趨勢。所以沒有理由懷疑假設檢定被違反，模型係正確且所有假設檢定均成立。

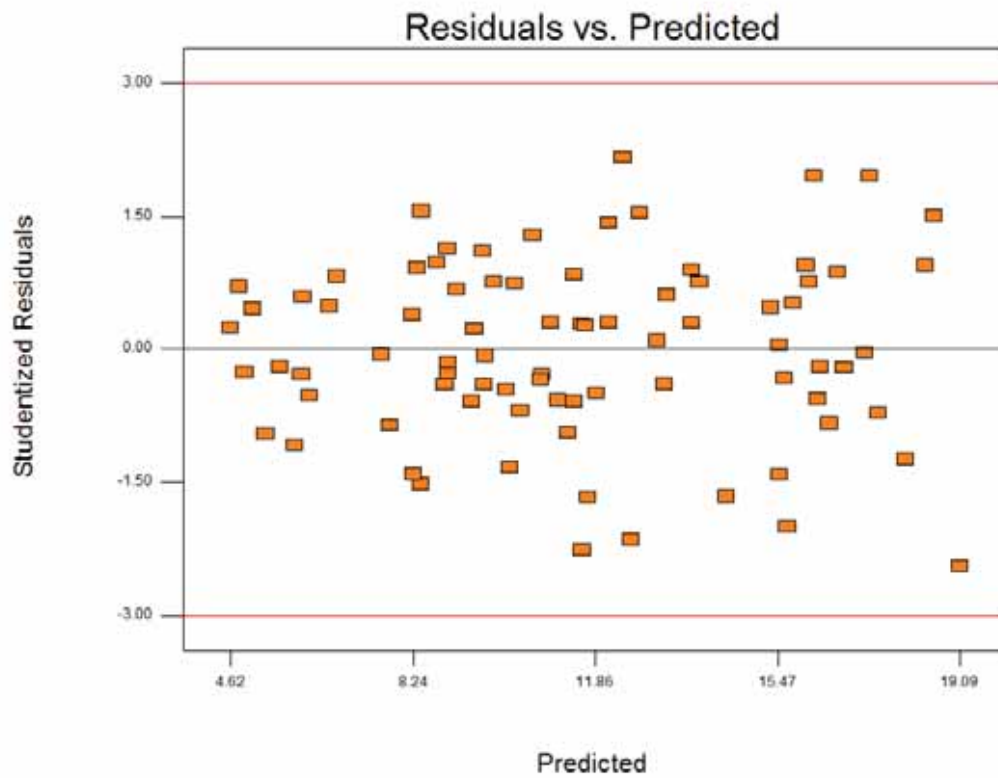


圖 4.85 孔隙率之殘差與預測值檢驗圖

4.2.6 迴歸預測圖

如圖 4.86 所示，為實驗值對預測值的比較，圖中的散佈點為實驗值，而實驗值越接近斜率為 1 的預測斜線代表預測越準確，因實驗為常態，所以迴歸直線為適用。

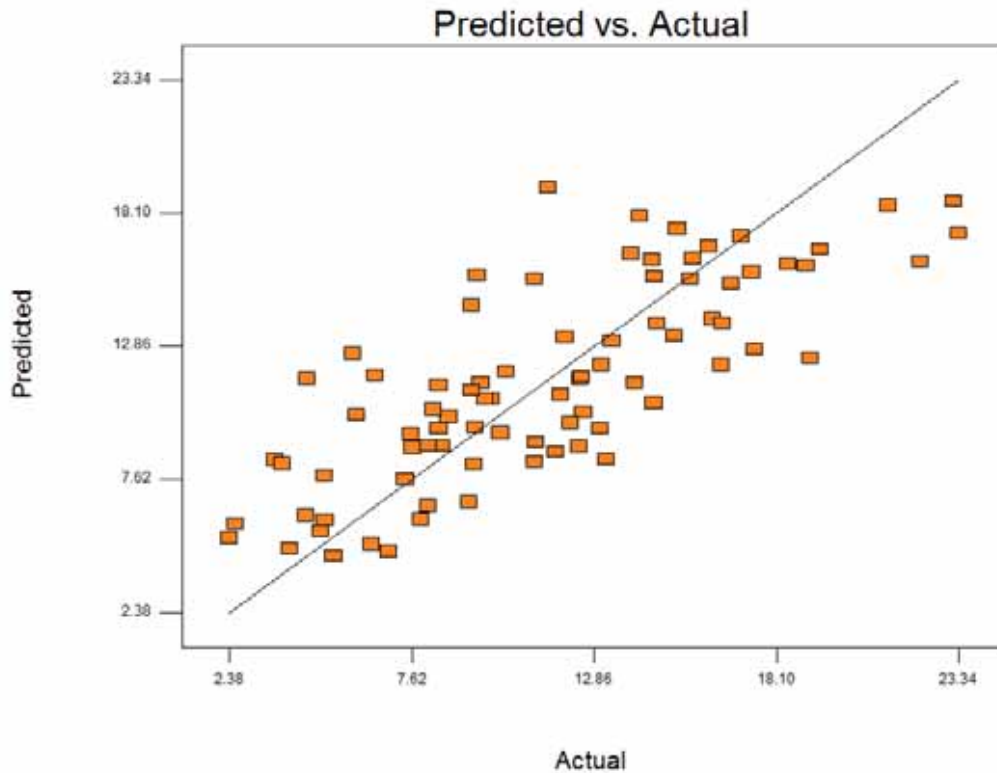


圖 4.86 迴歸預測值

4.3 最佳化結果

表 4.3 為雷射燒結孔隙率輸出品質特性之目標與規格限制，由 Design-Expert[®] 實驗設計軟體適配出最佳預測參數，計算出個別期望函數，再利用線性迴歸方程式來求出各實驗組合下的總期望函數。

表 4.3 輸出品質特性目標與規格限制

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Laser power	is in range	26	30	1	1	3
Speed	is in range	8	10	1	1	3
Frequency	is in range	130	150	1	1	3
Porosity	minimize	2.378	23.345	1	1	3

表 4.4 為 RSM 使用期望函數解出最佳化參數組合與輸出品質特性之排列，在這 81 組雷射燒結參數的最佳製程參數的孔隙率為 4.908、期望值為 0.879，以 RSM 預測最佳參數雷射功率為 30w、燒結速度為 10mm/s、雷射頻率為 150Hz。

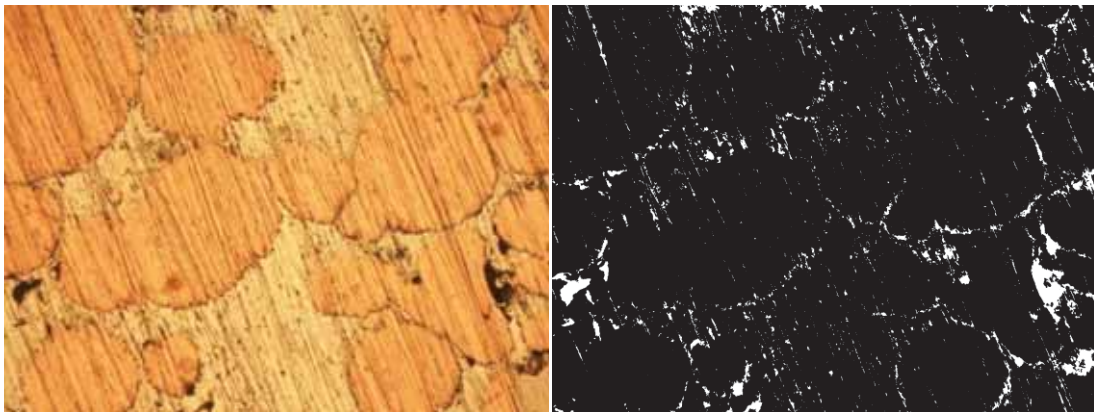
表 4.4 反應曲面法預測最佳參數組合

Laser Power (w)	Speed (mm/s)	Frequency (Hz)	Porosity (%)	Desirability
30	10	150	4.908	0.879

得到最佳化參數後，再將鈦錫金屬粉末以最佳化參數做試驗，並驗證與最佳化值的誤差，如表 4.5

表 4.5 驗證結果與誤差

Laser Power (w)	Speed (mm/s)	Frequency (Hz)	Porosity (%)	Actual Value	Error
30	10	150	4.908	5.355%	0.447%



(a)

(b)

圖 4.87 實驗驗證孔隙率為 5.355%

五、 結論

本研究探討金屬粉末光纖雷射燒結的製程參數對於孔隙率的影響，且利用實驗計畫法做變異數分析以及迴歸分析來計算最佳化組合，而影響孔隙率較大之因子以雷射強度、燒結速度、燒結速率為主。採用鈦粉與錫粉金屬粉末進行雷射燒結，以改變部分因子來減少孔隙為目標，本實驗結果如下列所示：

1. 在燒結過程中發現，若光纖雷射燒結功率太大，導致金屬粉末呈現焦化現象；燒結功率太小，則無法使金屬粉末成型。
2. 在研磨金相時桌面要保持平坦，有利於以顯微鏡拍攝時找到焦距，使用拋光機研磨拋光時加入氧化鋁粉水，有效減少金相之刮痕。
3. 由實驗計畫法分析，可清楚了解雷射燒結功率、燒結速度、燒結頻率、雷射燒結間距等因子與孔隙率有相當大的影響。
4. 由反應曲面法計算得知本實驗最佳化製程參數組合為：雷射功率 30W、燒結速度 10mm/sec、雷射頻率 150Hz、燒結間距 70 μ m；而最佳孔隙率為 4.908%。
5. 本實驗所得的光纖雷射金屬粉末燒結最佳化參數製程可有效的減少時間與成本，並提高效率及系統性的統計分析方法，使製程更有效率與符合經濟性等利益。

參考文獻

- [1] 郭啓全、鄭正元，快速成型原理與應用，高立圖書，2004 年。
- [2] 林嘉緯，陶瓷雷射燒結快速製造自動化，國立台北科技大學機電整合研究所，碩士論文，2004 年。
- [3] 嚴孝全，陶瓷雷射燒結快速原型技術之研發，國立台北科技大學機電科技研究所，博士論文，2007 年。
- [4] 蘇紘建，陶瓷雷射燒結快速原型技術之強度提升及生薄層塊去除研究，國立台北科技大學製造科技研究所，碩士論文，2008 年。
- [5] 謝立祥，以陶瓷雷射燒結法製作工件之精度及小型化，國立台北科技大學製造科技研究所，碩士論文，2008 年。
- [6] 邱銘祿，以漿料間接選擇性雷射燒結法製作陶瓷工件，國立台北科技大學機電科技研究所，碩士論文，2009 年。
- [7] 黃智德，陶瓷雷射燒結法工件之燒結精度研究，國立台北科技大學製造科技研究所，碩士論文，2010 年。
- [8] 王鈴鈞，氧化鎂與氧化鈮混合粉末之雷射燒結機制研究，國立臺灣師範大學物理學系，碩士論文，2010 年。
- [9] 李坤達，陶瓷雷射燒結法設備改良及氧化鋁工件製程研究，國立台北科技大學製造科技研究所，碩士論文，2010 年。
- [10] Simchi,A.and Pohl, H., Out.2003; “Effect of Laser Sintering Processing Parmeterson the Microstructure and Densification of Iron Power” , Materials Science and Engineering A,V359; n 1-2;, pp.119-128.
- [11] Zhou, J. and He, Z., 1998, “Rapid Pattern Based Powder Sintering Technique and Related Shinkage Control” ,Journal of Materials and Design, Vol. 19, pp.241-248.

- [12] Tolochko Nikolay, Mozzharow Sregei, Laoui Tahar, and Froyen Ludo, 2003, “Selective laser sintering of single-and two-component metal powders” ,Rapid Prototyping Journal, Volume 9, Number 2, pp.68-78.
- [13] Morgan , R., Sutcliffe, C. F. ,and O’Neil, W., 2001, “ Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd:YAG laser re-melted pre-placed powder beda ” ,Rapid Prototyping Journal, Volume7,Number 3, pp.159-172.
- [14] 李威勳，雷射燒結快速成型系統開發與組織工程支架應用之研究，長庚大學機械工程研究所，碩士論文，2006年。
- [15] 潘楷明，雷射燒結孔洞支架製作及測試，長庚大學機械工程研究所，碩士論文，2008年。
- [16] 劉喜文，雷射燒結快速成型技術結合高分子水膠於硬骨組織支架製程之發展與臨床評估，長庚大學醫療機電工程研究所，碩士論文，2009年。

明新科技大學 104 年度 研究計畫執行成果自評表

計畫類別： <input type="checkbox"/> 任務導向計畫 <input type="checkbox"/> 整合型計畫 <input type="checkbox"/> 個人計畫 所屬院(部)： <input checked="" type="checkbox"/> 工學院 <input type="checkbox"/> 管理學院 <input type="checkbox"/> 服務學院 <input type="checkbox"/> 人文社會科學院 執行系別： 機械工程系(中心) 計畫主持人： 廖信德 職稱：副教授兼研發長 計畫名稱： 雷射於鈦-錫粉末燒結緻密化之探討 計畫編號： MUST-104 機械-1 計畫執行時間： 104 年 1 月 3 日至 104 年 5 月 27 日					
計畫執行成效	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;">教學方面</td> <td style="padding: 5px;"> 1. 對於改進教學成果方面之具體成效： <u>瞭解快速成型的技術與原理</u> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">學術研究方面</td> <td style="padding: 5px;"> 1. 該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/>是 <input type="checkbox"/>否 計畫名稱： _____ 2. 該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/>已發表 <input checked="" type="checkbox"/>預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/>否 發表期刊(研討會)名稱： <u>第三十九屆全國力學會議</u> 發表期刊(研討會)日期： <u>104 年 11 月 20~21 日</u> 3. 該計畫是否有要衍生產學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/>是 <input type="checkbox"/>否 <u>技術移轉---"金屬粉末雷射燒結成型最佳化", 2015.09.16 , 優克材料科技股份有限公司, \$50,000。轉(工)104-0002。</u> <u>產學合作---"疲勞耐久試驗機設計與製作", 2015.07.01~2016062.30, 合信汽車工業股份有限公司, \$4,900,000。產(工) 104-0050。</u> <u>產學合作---"電子圖檔委託", 2015.01.01~2015.12.31, 隆山元工業股份有限公司, \$500,000。產(工) 104-0002。</u> </td> </tr> </table>	教學方面	1. 對於改進教學成果方面之具體成效： <u>瞭解快速成型的技術與原理</u>	學術研究方面	1. 該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 計畫名稱： _____ 2. 該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/> 已發表 <input checked="" type="checkbox"/> 預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/> 否 發表期刊(研討會)名稱： <u>第三十九屆全國力學會議</u> 發表期刊(研討會)日期： <u>104 年 11 月 20~21 日</u> 3. 該計畫是否有要衍生產學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <u>技術移轉---"金屬粉末雷射燒結成型最佳化", 2015.09.16 , 優克材料科技股份有限公司, \$50,000。轉(工)104-0002。</u> <u>產學合作---"疲勞耐久試驗機設計與製作", 2015.07.01~2016062.30, 合信汽車工業股份有限公司, \$4,900,000。產(工) 104-0050。</u> <u>產學合作---"電子圖檔委託", 2015.01.01~2015.12.31, 隆山元工業股份有限公司, \$500,000。產(工) 104-0002。</u>
教學方面	1. 對於改進教學成果方面之具體成效： <u>瞭解快速成型的技術與原理</u>				
學術研究方面	1. 該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 計畫名稱： _____ 2. 該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/> 已發表 <input checked="" type="checkbox"/> 預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/> 否 發表期刊(研討會)名稱： <u>第三十九屆全國力學會議</u> 發表期刊(研討會)日期： <u>104 年 11 月 20~21 日</u> 3. 該計畫是否有要衍生產學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 <u>技術移轉---"金屬粉末雷射燒結成型最佳化", 2015.09.16 , 優克材料科技股份有限公司, \$50,000。轉(工)104-0002。</u> <u>產學合作---"疲勞耐久試驗機設計與製作", 2015.07.01~2016062.30, 合信汽車工業股份有限公司, \$4,900,000。產(工) 104-0050。</u> <u>產學合作---"電子圖檔委託", 2015.01.01~2015.12.31, 隆山元工業股份有限公司, \$500,000。產(工) 104-0002。</u>				
	計畫預期目標： 計畫執行結果： 利用光纖雷射直接照射金屬粉末製作金屬工件之概念與相關技術，找出影響製作金屬工件品質之製程參數。 <div style="text-align: right;">預期目標達成率：100 %</div>				

成果自評	<p>其它具體成效：</p> <p>由實驗計畫法分析，可清楚了解雷射燒結功率、燒結速度、燒結頻率、雷射燒結間距等因子與孔隙率有相當大的影響。</p> <p>(若不敷使用請另加附頁繕寫)</p>
------	--