

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

光纖雷射應用於金屬粉末燒結可行性之探討
A Feasibility Study of Fiber Laser Based Selective Metal Powder
Sintering

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-98 機械-5

執行期間：98 年 1 月 1 日至 98 年 9 月 30 日

計畫主持人：廖信德

共同主持人：

計畫參與人員：

黃偉鈞

黃國成

處理方式：公開於校網頁

執行單位：機械工程系

中華民國九十八年九月三十日

明新科技大學校內專題成果報告 公開授權書

(提供本校辦理紙本與電子全文授權管理用)

本授權書為明新科技大學校內專題研究計畫成果報告授權人：_____廖信德_____

在明新科技大學 _____工_____學院 _____機械工程_____系所 _____98_____

年度校內專題研究計畫。

研究計畫編號：MUST-98 機械-5

研究計畫名稱：光纖雷射應用於金屬粉末燒結可行性之探討

計畫類型：_____個人型_____

執行期限：_____98年 1 月 1 日 至 98年 9 月 30 日_____

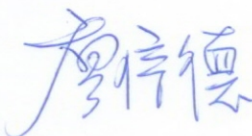
茲同意將授權人擁有研究之上列成果報告：紙本授權全文公開陳列於本校圖書館，為學術研究之目的以各種方法重製，或為上述目的再授權他人以各種方法重製，不限地域與時間，惟每人以一份為限；成果報告之電子檔（含摘要），本校圖書館保留以供文獻典藏使用，但可依使用權限授權於網路公開，提供讀者非營利性質之免費線上檢索、閱覽、下載或列印。

成果報告之電子檔案使用權限授權，請勾選下列一項：

- 校內外立即公開全文(含摘要)
- 校內外立即公開摘要，校內立即公開全文，一年後校外公開全文
- 校內外僅於公開摘要，校內立即公開全文，校外永不公開全文

授權人：廖信德

(請親筆正楷簽名)



E-Mail：liao@must.edu.tw

中 華 民 國 九 十 八 年 九 月 三 十 日

摘 要

由於機、光、電技術進步與 CAD 的成熟，加上對快速及低價位開發產品的需求，過去十多年來，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甚少為金屬材料，也因此限制了快速模具的發展。雷射直接燒結是很新的一項技術，它具有直接從金屬粉末產生工件的能力，這樣的製程使得直接製造功能原型件或金屬模具成為可能。本計劃之主要目的在利用光纖雷射燒結金屬粉末之原理，對金屬粉末在直接燒結過程中，影響燒結最終品質之製程參數予以深入了解。為了減少或甚至不要燒結後的滲入工作以縮短加工時程，將嘗試燒結兩種金屬混合粉末，以低熔點的粉末當作結合劑用，同時藉由燒結中的驅動力與毛細現象充填空孔，並配合實驗計畫法的應用，找出雷射燒結金屬成型的最佳製程參數，以便提供製作快速金屬模具機台中有關成型材料的相關技術。

關鍵詞：直接雷射燒結、快速成型、快速模具、鎳粉末、孔隙率

ABSTRACT

Due to the progress in Opto-Mechatronics technology, the maturity of CAD, and the demand for faster and less expensive product development, the flourishing development of rapid prototyping has reduced the time of developing a new product in past ten years. However, most of the rapid prototyping machines use non-metal materials. Therefore, it restricts the development of rapid tooling machines. Direct laser sintering is one of the new technologies which possess the capability to produce parts directly from metal powders. Such manufacturing process has potentiality directly to produce functional prototypes and tools. The main objective of the proposed research is to investigate the effect of various parameters on rapid prototyping parts during the process of sintering metal powders by using fiber laser. In order to minimize and eliminate the infiltration after sintering and reduce time lag, sintering a mixture of two metallic powders are investigated. The metallic powders with a low melting point acts as binder. The binder powders are first melted and then flow by driving forces and capillary forces through the pores between the high melting point powders. By applying a design of experiment method (D.O.E.), the optimal settings of the process parameters during laser sintering and qualified materials are obtained through the repeated experiments in order to provide the know-how technique for developing a new rapid tooling machine.

Keywords : Direct Laser Sintering, Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Ni Powder, Porosity

目 錄

公開授權書	I
中文摘要	II
英文摘要	III
目錄	IV
圖目錄	V
表目錄	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	12
五、結論	39
參考文獻	40
計畫成果自評表	42

圖目錄

圖 3-1. 光纖雷射激發器.....	8
圖 3-2. 光纖雷射機台.....	9
圖 3-3. 操作參數值畫面.....	9
圖 3-4. 金相顯微鏡.....	11
圖 4-1. 功率 10% 雷射加工顯像	12
圖 4-2. 功率 10% 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	13
圖 4-3. 功率 12% 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	14
圖 4-4. 功率 11 % 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	15
圖 4-5. 功率 10% 速度 350($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	16
圖 4-6. 功率 10% 速度 350($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	17
圖 4-7. 功率 10% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	18
圖 4-8. 功率 15% 速度 500($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖	19
圖 4-9. 功率 15% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	20
圖 4-10. 功率 10% 速度 200($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	21
圖 4-11. 功率 10% 速度 600($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	22
圖 4-12. 功率 15% 速度 600($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	23
圖 4-13. 功率 11% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	24
圖 4-14. 功率 20% 速度 5000($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	25
圖 4-15. 功率 20% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	26
圖 4-16. 功率 15% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	27
圖 4-17. 功率 25% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	28
圖 4-18. 功率 20% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	29
圖 4-19. 功率 25% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	30
圖 4-20. 功率 23% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	31
圖 4-21. 功率 23% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	32
圖 4-22. 功率 24% 速度 8000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	33
圖 4-23. 功率 20% 速度 8000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	34
圖 4-23. 功率 28% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	35
圖 4-24. 功率 28% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	36
圖 4-25. 功率 25% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	37
圖 4-26. 功率 25% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖.....	38

表 目 錄

表 3-1、高功率雷射性能之比較.....	4
表 3-2. YLR-200-AC 雷射儀器規格.....	10

一、前言

近年來產品的生命週期越來越短，產品不斷推陳出新，尤其是 3C 有關產品，如何爭取時效，縮短產品開發時間，減少開發成本，改進產品品質，將是企業生存的不二法門，因此，快速成型（Rapid prototyping）與快速模具（Rapid Tooling）這二種技術因運而生，過去十幾年來，快速成型與快速模具的相關技術已有了很大的進步[1]，而這些技術目前也已被廣泛地應用在醫學醫療上，如 MRI 與 CT 掃描所建的 RP 模型，可用在外科與重建手術的規劃，還有牙齒模型、義肢及人工關節之設計製造。

快速成型（RP）是一種機、光、電整合應用的技術，它可用來快速製造精細複雜的 3D 物體，其又名無模成型、光造型、快速原型或立體模型成型等。以上各種名稱，涵意上雖然略有所差異，但其基本原理與方法可謂無二致，即是一種新的自動化製造技術，使用雷射光依 CAD/CAM 指令所建立之元件模型，以一層一層逐漸遞增式將層(layer)的液態、粉末或薄片之材料堆疊製成三維的立體物件。此技術可在無刀具、夾具及工具機之情況下，直接將電腦程式中任何複雜的 CAD 數學模型在數小時內直接製成 3D 實體，而傳統上製作一個實體原型大約需要六星期以上的時間。由於產品的造型設計及加工成型過程之高度電腦化，使得快速成型技術受到普遍的重視，它對任何複雜形狀元件製作，皆能在很短的時間內完成。這項技術比任何 NC 工具機加工或開模製造方式要節省許多時間與人力，同時對成本的降低也有很大的助益，尤其對於設計及造型工程師來說，是一項相當有利的工具。其次，快速成型技術可以使設計和製造結合成一體，在產品設計之任何階段中，能以真實的立體模型來測試其設計的可行性，還有產品之外觀是否達到設計的需求，還有對組裝與干涉的檢討，也可製作出產品原型，以便作為行銷時提供客戶的樣品。

在 RP 技術的延伸應用上，有了快速模具（Rapid Tooling）技術的產生，藉由 RT 技術可以很快的製作出功能性測試原型件，也可做小量生產或試產，當然最終目標是能夠製造出量產射出模具，直接裝在射出成型機上，以便進行大量的射出成型，所謂**快速模具（RT）**是指可以很快又有效率地製造出承受較高負載的工件或大量生產用的金屬模具，到目前為止，已有十餘種以上的 RT 技術被提出應用，如 Investment Casting Technique, Silicone Rubber Technique and Keltool, Selective Laser Sintering (SLS) and Electro Optical System (EOS) sintering Machine 等，台灣大學電機系羅仁權教授[2]針對國內外快速模具技術的發展現況與未來技術做了相當詳細的闡述，這篇文獻對現有的商品化快速模具產品的工作原理也有概略的說明，郭啟全[3]也介紹了許多種快速模具技術系統的工作原理與應用範圍，而黃國顏[4]則對金屬樹脂快速成型法的製模技術加以探討，以上這些，對此計畫的構想與實驗規劃有極大的啟示。

國內近幾年來，在台灣大學電機系羅仁權教授[5]的大力推動與帶領之下，已有許多的學校投入這方面的研究，相關的設備也增加很多，羅校長剛完成一個國科會 3 年期的整合型計畫---先進快速原型系統應用於產業自動化及電子化，其中一個子計畫是”快速直接金屬模具研製應用快速原型技術之研發”，目前已完成一本土化快速模具設備的雛形[6]，如台灣科技大學的鄭正元教授[7,8]、台北科技大學的湯華興與汪家昌教授[9]、成大的黃聖杰教授[10]與汪維祥教授、中正大學林榮信教授[11]、高雄第一科大姚文隆教授、崑山科大的張仲卿教授，還有其他的許多教授等等，他們的研究除了在希望提昇現有設備的效率與品質之外，也嘗試探討新的快速成型技術以供新製程或新機台的開發作參考，目前都已有不錯的成果，在微快速成型機的研發上，則有台灣科技

大學的鄭正元教授[12]，台北科技大學的汪家昌教授[13]，及崑山科大的張仲卿教授[14]。

至於國外方面，目前許多商品化的產品大都是來自美國、日本與歐洲，而在研究方面，美國的 university of Missouri—Rolla. Dr. M. C. Leu 嘗試快速凍結(Rapid Freeze Prototyping)的方法[15,16]，將水凍結成所要的 3D 模型之冰塊，此方法的好處在於便宜、快速、與不會產生有毒物質造成環境污染，不過其支撐的部份尚待加以研究改進，另外 Drexel University 的 Dr. Zhou [17]提出了一種結合現有商品化的快速模具技術的優點，從熱變形與熱穩定性的考量，加於慎選適當的結合劑(binder)，則可改進現有技術的部分缺點。Dr. Zhou [18] 亦提出了改進快速金屬成型中如何控制收縮的相關技術。Kathuria [19,20,21] 則探討雷射燒結混合金屬粉末成型的可行性，新加坡的 Y. Tang 等人利用雷射直接燒結銅合金[22]，德國的 A. Simchi 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[23]，Morgan 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[24]，Tolochko 討論雷射對單金屬粉末與雙金屬粉末燒結的影響[25]，上述這幾篇文獻對本計畫的規劃有很大的幫助，而計畫主持人之前亦應用 Nd:YAG 雷射探討過燒結金屬粉末的可行性[26]，已獲一定的成果。

二、研究目的

本研究目的在利用光纖雷射燒結金屬粉末之原理，對金屬粉末在直接燒結過程中，影響燒結最終品質之製程參數如雷射能量、燒結速度、雷射聚焦點位置、雷射掃描速度、雷射打點之解析度、及金屬粉末顆粒大小或混和比予以深入了解，並配合實驗計畫法的應用，找出最佳的製程參數之設定，以便提供製作快速金屬模具機台中有關成型材料的相關技術，燒結的結果將藉由影像式工具顯微鏡來觀察它的微結構組織、應用 Nikon NEXIV VMR 3020 高精密自動化影像量測系統求出金屬粉末燒結後孔隙率及利用微硬度計測試它的硬度，再配合機構的設計與控制，進而嘗試直接製作快速金屬模具機台。本計劃雖以金屬粉末為研究對象，但所得到之機台試作的技術與經驗，可進一步延伸到不同材料之上。

在分析方面，則應用工業實驗計畫法 (Design of Experiments 簡稱 D.O.E.)，以一些雷射的製程參數，例如雷射能量、雷射脈衝寬度與頻率、燒結速度、雷射聚焦點位置、及金屬粉末顆粒大小及混合比等當作因子 (factors)，而以金屬粉末燒結後的硬度、強度及孔隙率當作品質特性來探討，嘗試從雷射機台參數尋求影響燒結品質的因子做為發展快速金屬模具機台的技術 know-how。

三、研究方法

本系現有 Nd:YAG 雷射、準分子雷射、二極體雷射與三倍頻紫外光雷射，而這學期更採購最新的光纖雷射(fiber laser)。本研究主要利用光纖雷射直接燒結金屬粉末，而以其他的雷射設備為輔，以探討影響燒結品質之製程參數，進而提供建立快速金屬模具的技術，所以對雷射之特性需加以瞭解，其中三倍頻紫外光雷射的波長只有 0.355 μ m，配合光硬化樹脂，將很適合用來發展微型快速成型機，在此研究中，我們先進行先期性的實驗探討。

光纖雷射之特性：

光纖雷射具有能源轉換效率高、光束品質佳、產品輕薄短小、營運成本低及壽命長等優點，近來挾其先天諸多優點而快速崛起，被譽為 21 世紀的雷射。最近十年光纖雷射之輸出功率以每年倍增之速度高度成長，目前高功率單模態光纖雷射已進入千瓦 (kW) 功率等級之里程碑，預期未來將繼續保持高度成長，朝 100 kW 之輸出功率邁進。

表 3-1、高功率雷射性能之比較

雷射種類	Fiber	Nd:YAG	CO ₂
能源轉換效率	~30%	~5%	~10%
CW 輸出功率	最高 200 KW	12 kW	20 kW
光束品質 (mm × mrad)	~5@10kW	~25	~6
二極體壽命 (小時)	100,000	10,000	N.A.
冷卻方式	氣冷/水冷	水冷	水冷
所佔平面空間	< 1 m ²	6 m ²	3 m ²
營運成本 (每小時台幣)	745	1,350	850
維修頻率	很少	偶爾	經常

一般金屬粉末燒結常使用 CO₂ 或 Nd:YAG 雷射為工具，而最新的光纖雷射具有如下之優點：

高功率光纖雷射具備卓越的光束性能，致使其在焊接、切割、標記、鑽孔及精密微細加工等雷射加工應用上有近乎完美的表現。一般常見之高功率雷射加工光源包括光纖雷射、摻釹鈮石榴石雷射、碟片雷射、二氧化碳雷射及高功率光纖耦合之半導體雷射。表一是上述各種高功率雷射之性能比較，可看出與其他雷射相比，光纖雷射具有以下之優點：

1. 高能源轉換效率：光纖雷射增益介質長度較長，具有較高的單次增益，通常摻鏡光纖雷射斜率效率可達 85%，整體之電光轉換效率約在 30% 左右。
2. 高功率輸出仍可保持良好之光束品質：光纖雷射在 1 kW 單模態輸出時光束參數乘積可達 1 mm × mrad 左右，此時 M^2 值約為 1.4，接近於繞射極限，在雷射功率 10 kW 時光束參數乘積也僅約 5 mm × mrad 左右，優於其他種類之高功率雷射。
3. 超高壽命：光纖雷射壽命通常決定於激發用之半導體雷射光源，若使用寬帶半導體雷射作為激發光源，其壽命通常可達 100,000 小時。
4. 卓越之散熱性能：由於光纖雷射的轉換效率高，通常只有 15% 的輸入能量轉換為熱能，與其他固態雷射相比，光纖又具有極高之表面積對體積比 (ratio of surface-to-active volume)，因此光纖雷射易於散熱，通常只需採用氣冷方式冷卻。
5. 產品具有輕薄短小之特色：縱然光纖雷射長度較長 (通常 1-10 公尺)，然而可藉由盤繞等構裝技術，大幅縮減所佔體積，另外由於直接使用氣冷裝置而免於搭配其他笨重之冷卻設備，因此整體體積並不太大(平面空間 $< 1 \text{ m}^2$)，通常可用於桌上型系統 (desktop system)。
6. 營運及維修成本低：由於能源轉換效率高，可大幅節約長工作時間運轉之耗電；所需反射鏡片數較少，若使用光纖光柵作為反射鏡則不需任何外加鏡片作為共振腔，因此具備高度穩定性能。

基於以上之優點，本研究應用光纖雷射直接燒結金屬粉末。運用雷射直接燒結金屬粉末之技術可以達到高精密度、高可靠度和高品質的需求並提供了下列之優點：

- 精確之對齊(precise alignment)
- 低能量輸入(small input energy)
- 熱影響區小(small heat affected zone)
- 非接觸式程序(non-contact process)
- 高重覆性(high repeatability)

而利用光纖雷射從事金屬粉末直接燒結，必須對金屬粉末直接燒結過程之種種複雜的製程參數予以深入了解，方能建立完善之技術 know-how，一般而言，影響燒結最終品質之製程參數相當繁多且複雜，本研究所選擇的重要參數如下：

- (1) 燒結之金屬粉末材料
- (2) 金屬粉末之顆粒大小
- (3) 混合金屬粉末的粒度比與混合比
- (4) 金屬粉末溫度(預熱與否)
- (5) 雷射能量
- (6) 燒結速度
- (7) 聚焦點位置
- (8) 聚焦點大小
- (9) 掃瞄間距

因此，針對上述製程參數予以有系統之研究，並配合實驗計畫法的應用，找出最佳

的製程參數之設定，以求得最佳之燒結結果。

實驗部份

本研究的實驗進行如下：

- (1) 探討的金屬粉末為：錫粉末(熔點為 232°C)、鐵粉末(熔點為 1540°C)、銅粉末(熔點為 1083°C)、鎳粉末(熔點為 1455°C)。
- (2) 若雷射光點面積(spot size)大於粉末顆粒的大小，則雷射燒結時容易產生球化的情形，使得成型的粉末顆粒比原來的更大，所以需慎選金屬粉末的粒度。
- (3) 為了減少熱應變，在雷射燒結前，將對金屬粉末預熱，或用黏著劑使第一層粉末黏在基板上以減少翹曲，至於預熱溫度需為多少較適合，也是探討的重點。
- (4) 在金屬粉末燒結的疊層方面，相鄰兩層的雷射掃瞄路徑是相互正交或平行才有助於提升強度，也將分別進行實驗探討。
- (5) 首先對以上的金屬粉末在各種不同的製程參數下，以接近熔點的溫度但又稍低於熔點溫度個別進行雷射燒結，因為在此溫度下燒結，兩相鄰的金屬粉末顆粒之間會形成 neck 的現象，這將減少表面積而增加蠕動，以避免形成球狀結構而產生許多的空孔，因此首先必須配合紅外線測溫儀，找出在何種雷射加工機的參數下，可以獲得所需的燒結溫度。
- (6) 為了減少甚至去掉燒結後的滲入工作以縮短加工時程，計畫利用低熔點之錫粉末(Sn)分別與較高熔點的鐵(Fe)、銅(Cu)、或鎳粉末(Ni)，以不同的比例及顆粒大小混合作為主要的燒結材料，低熔點的錫粉末將當作結合劑用，而高熔點的金屬粉末則作為主要的結構材料，如此當燒結溫度介於錫粉熔點與高熔點粉末之間時，錫粉開始融熔並可藉著毛細現象充填結構材料顆粒間的空孔，如此將可減少空孔而得到較好的細緻化(densification)，另外為了讓錫粉能夠完全熔融以達到較佳的結合效果，錫粉末的顆粒尺寸要比當作結構用的材料來得小，免得錫粉尚未完全熔融，熔點粉末也已開始熔融。
- (7) 為了增加金屬粉末燒結後的強度，也將探討事先在粉末裡加入適當的黏結劑的可行性。
- (8) 在燒結成型過程中，亦需噴出保護氣體，如 N_2 或 Ar，以防止工件氧化。

觀察與分析部份

- (1) 應用 Nikon NEXIV VMR 3020 高精度自動化影像量測系統 (resolution: 0.1μ , 量測元件最小尺寸: 5μ , 可量測範圍: $300\times 200\text{mm}$) 來觀察金屬粉末燒結後的混合情形及空孔，其所拍攝的照片，應用一般的照片分析技術，如二值化和邊界徵測等等，透過 LabView 所寫的軟體，可求出金屬粉末燒結後空孔的佔有率，以調整所需要的製程參數。
- (2) 藉由微硬度量測儀來測試金屬粉末燒結後的硬度。
- (3) 利用金相顯微鏡與金相分析軟體來探討金屬粉末燒結後的結晶組織。
- (4) 利用工學院之 SEM 的設備，觀察金屬粉末燒結後的細微結構。

以上的觀察及測試有助於預先縮小尋找適當製程參數的範圍。接著將應用實驗計畫法來找出最佳的製程參數設定值與主控的參數，實驗計畫法是一種功能強大的實驗設

計方法，它可以幫助找出反應方程式，進而求出此方程式最佳化的係數，在工業應用上，它可以有系統地分析對影響產品品質的製程參數，在確認影響產品品質的製程情形與參數之後，就可以進行改善以提高產品的品質、可靠度、以及製造效率。

由於資源的限制，因此能從每一次進行的實驗中，得到大部份的訊息是很重要的，良好的實驗設計可以產生很有幫助的訊息，同時也可以減少實驗的次數，而不必多進行了一些雜亂又沒有規劃的實驗。例如，如果相信存在二個參數有互相作用的影響，就不要做”one factor at a time”的實驗。

實驗計畫法的進行步驟有四：規劃（Planning）、篩選（Screening）、最佳化（Optimization）、驗證（Verification）。在規劃階段中，需先定義問題及目的，然後提出一套能夠提供有用訊息的實驗計劃，最後確認製程及測量系統是可以控制的。在許多的製程生產應用當中，影響最終品質的參數可能有很多，因此需篩選出真正重要的參數或稱為”vital few”，在確認”vital few”之後，接著就是決定這些實驗因子的最佳值，最後當然需要再進行實驗去驗證分析結果。

我們採用 MiniTab 軟體來幫助進行上述的步驟，在篩選與最佳化的階段中，將應用 MiniTab 軟體中的 Factorial Designs 方法，本研究將先以金屬粉末燒結後的硬度、強度、及孔隙率為品質評估標準(Yield)，初期將選用雷射能量、燒結速度、雷射聚焦點位置、脈衝次數、雷射掃瞄速度、雷射打點之解析度、及金屬粉末顆粒大小或混和比為因子(factor)，初始階段，每個因子的 level 的數目越少越好（所以先用 2 個 level），而範圍則是越廣越好，然後再增加 level 及減小範圍，等到找出最佳化的反應方程式之後，再進行一系列 follow-up 的實驗以驗證上述分析的結果。

光纖雷射(Ytterbium Fiber Laser)操作

作業程序如下:

1. 開機:機台電源順序為(1)雷射機台電源(2).雷射激發器電源(3)電腦電源(4)雷射螢幕電源。
2. 機台自動復歸:工作平台與機台重置。
3. 鋪粉:將鎳(Ni)粉末鋪平至自製工件凹槽。
4. 繪製燒結形狀:利用雷射機台本身的繪圖軟體，繪製想要的燒結形狀。
5. 雷射中心對焦:利用電腦將雷射機台的中心對準。
6. 調整參數:設定功率大小、線條間距...等，設計參數，並要依照參數施作，同一參數連續加工好幾次這是錯誤的。
7. 對焦:調整離焦距離(調整雷射至工作表面之最佳位置)。
8. 開始燒結:由於這台機器目前最低功率為 20Kw，最高為 200kw 故由最低 20Kw 開始燒結，實驗燒結情況。
9. 燒結完成:利用鑷子將燒結物，從粉末中取出。
10. 將燒結物照相:利用材料實驗室的高倍率工具顯微鏡拍照，並照相存檔。



圖 3-1.光纖雷射激發器



圖 3-2.光纖雷射機台



圖 3-3.操作參數值畫面

所用的光纖雷射(Ytterbium Fiber Laser)之型號為 YLR-200-AC 其規格如表 3-2

表 3-2. YLR-200-AC 雷射儀器規格

	Characteristic	Symbol	Test conditions	Test results	Unit
	Optical characteristics				
1.	Operation mode			CW/modulated	
2.	Nominal output power	P_{nom}	I=93%	200	w
3.	Maximum output power	P_{max}	I=100%	215	w
4.	Emission wavelength	λ	$P_{out}=P_{nom}$	1070.3	nm
5.	Emission linewidth	$\Delta\lambda$	$P_{out}=P_{nom}$	2.7	nm
6.	Short-term power instability		$P_{out}=P_{nom}$ Range:10kHz-20MHz	1.1	rms%
7.	Long-term power instability		$P_{out}=P_{nom}$ T=const	<1	%
8.	Switching ON time		$P_{out}=P_{nom}$	29.6	μ sec
9.	Switching Off time		$P_{out}=P_{nom}$	8.6	μ sec
10.	Power modulation rate		$P_{out}=P_{nom}$	Tested	kHz
11.	Red guide laser power			0.4	mW
	Optical output				
12.	Output fiber termination			collimator	
13.	Beam quality	M^2		1.09	
14.	Beam diameter($1/e^2$)	W_0		5.4	mm

其重要的參數如下:

Emission linewidth:雷射聚焦後的寬度

Beam diameter($1/e^2$):雷射光束直徑

Emission wavelength:雷射波長

Maximum output power:最大輸出瓦數

Short-term power instability:能量短暫不穩定

Red guide laser power:紅色指引雷射光能量



圖 3-4. 金相顯微鏡

實驗因子說明

可控制因子:

A 功率(Kw):輸入之能量。

B 離焦距離(μm):雷射焦點與粉末的距離。在焦點時，能量最大，雷射光點尺寸最小，打在粉末上的面積也最小，燒結成形的顆粒會較小，但有可能因能量太大造成無法成形，所以必要時需將焦點遠離粉末，使能量變小。

C 速度(mm/sec):雷射掃瞄的速率。在固定雷射功率及焦距下，工件移動速度越快，雷射束作用時間越短，相對作用在粉末上的能量越小。

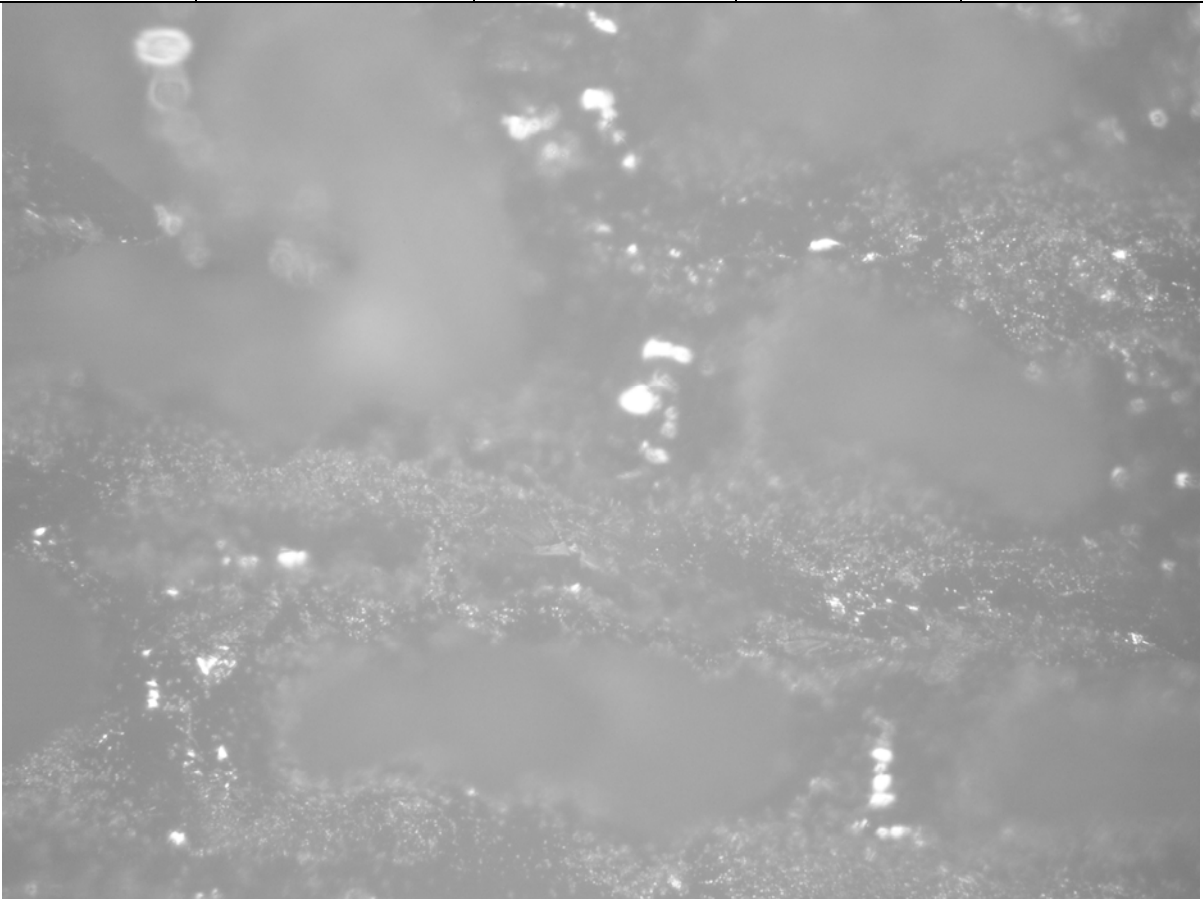
D 掃描間距(mm):兩相鄰掃描路徑間的距離。

四、實驗結果與分析

實驗的結果由金相顯微鏡 (OLYMPUS BH2-UMA) 作觀察與分析，各項實驗結果之分析說明如下：

4-5. 實驗結果

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	300	-65079	0.005	10%



特徵:
離焦 20mm 時，無明顯燒結顆粒，可能是線條間距、功率過大與移動速度過慢，導致燒結表面凹洞過大，有燒過頭的感覺。

圖 4-1. 功率 10%速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

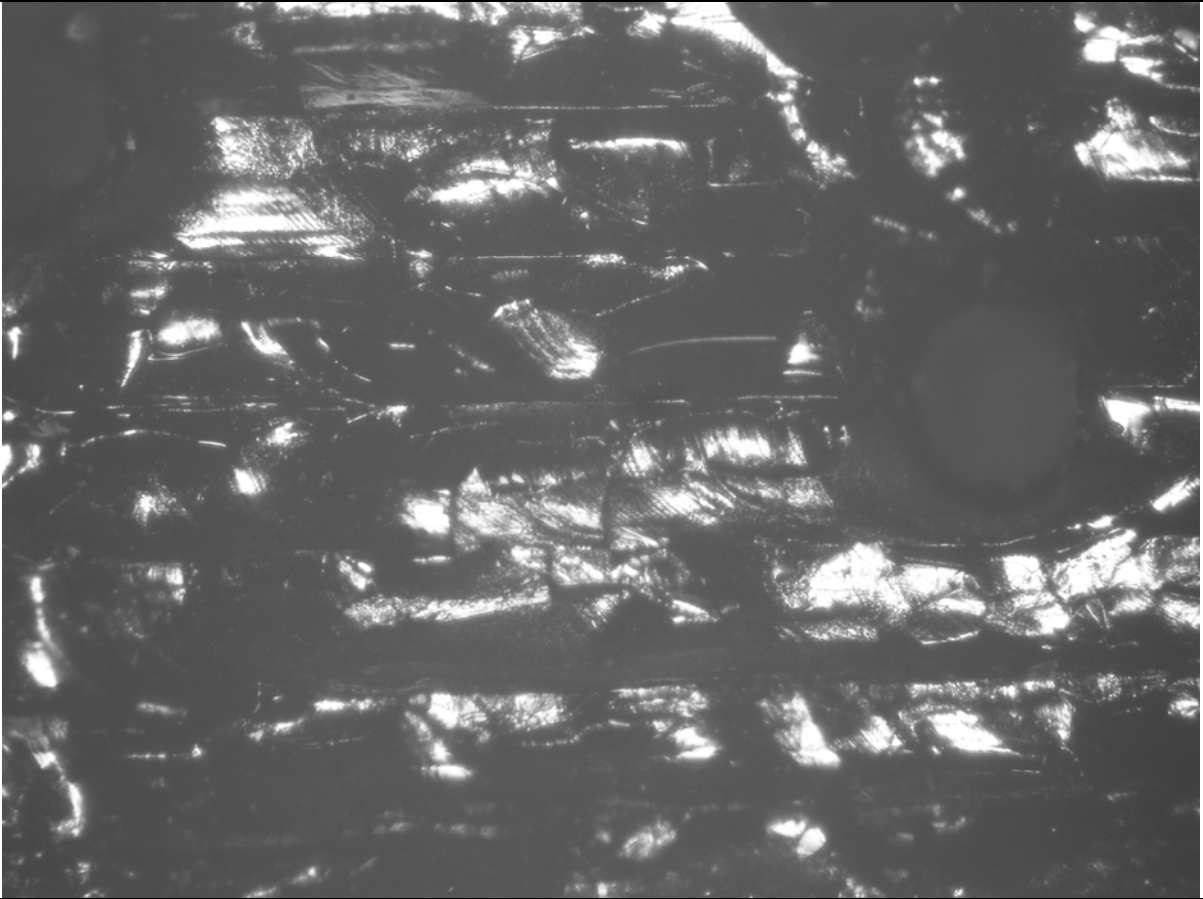
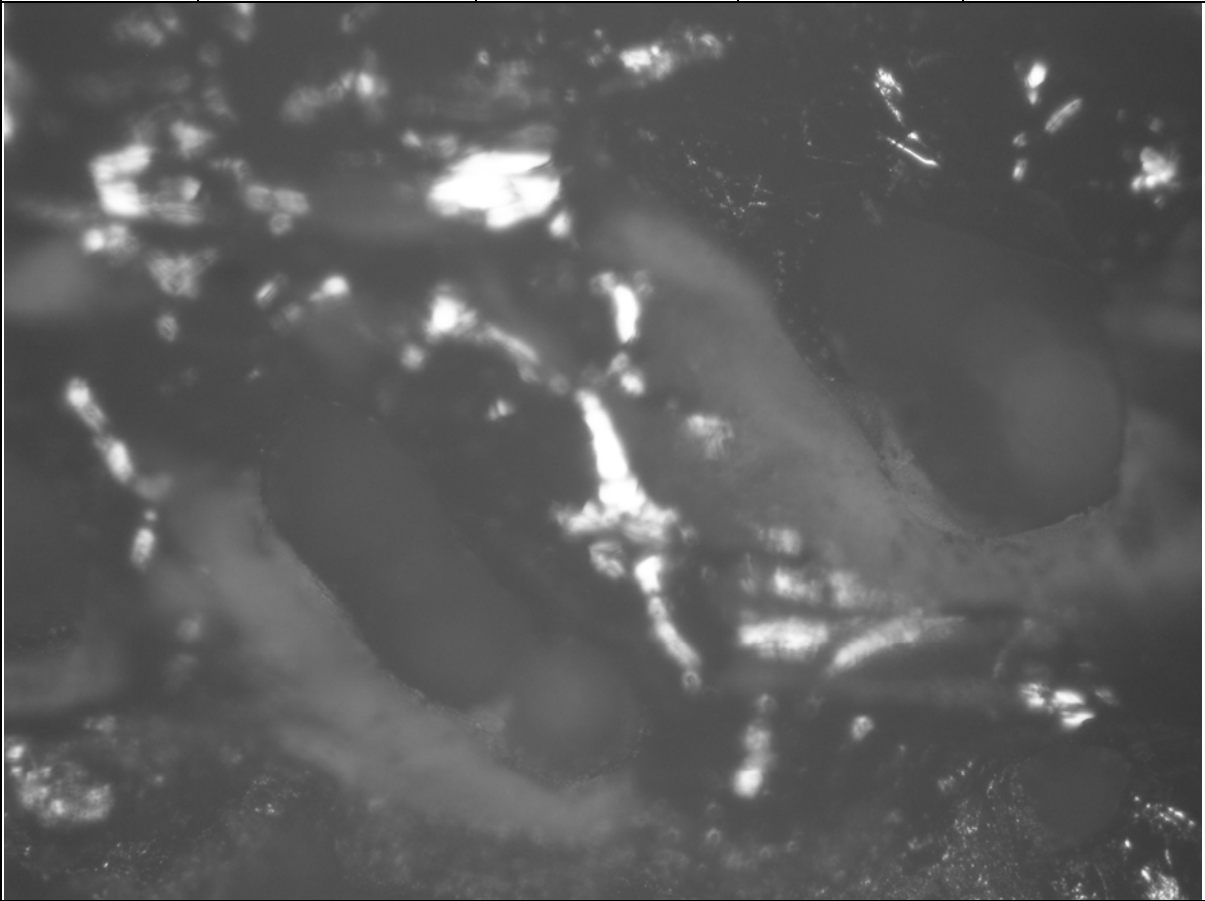
控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	300	-65079	0.002	10%
				
<p>特徵: 表面燒結較平整，但燒結程度不平均，有微焦的現象，線條間距 0.002mm 所成型的平面較 0.005mm 的線條接縫處好。</p>				

圖 4-2. 功率 10% 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	300	-65079	0.002	12%

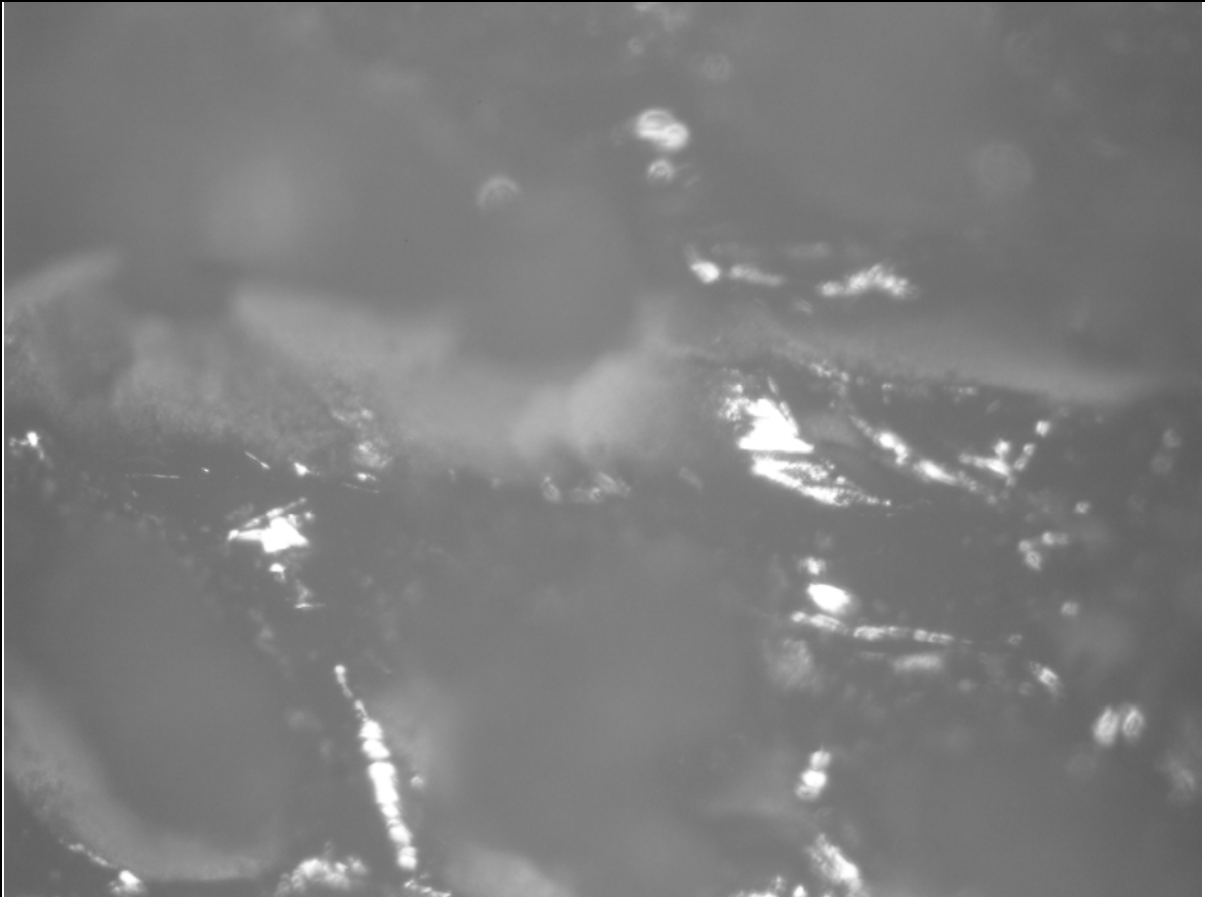


特徵:

有明顯燒結反應，可能是功率過大，導致燒結表面凹洞過大，表面坑洞過多，且表面有微黑。

圖 4-3. 功率 12% 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	300	-65079	0.002	10%



特徵:

有明顯燒結反應，可能是功率過大，移動速度過慢，導致燒結表面凹凸不平。

圖 4-4. 功率 10% 速度 300($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	350	-65079	0.002	10%

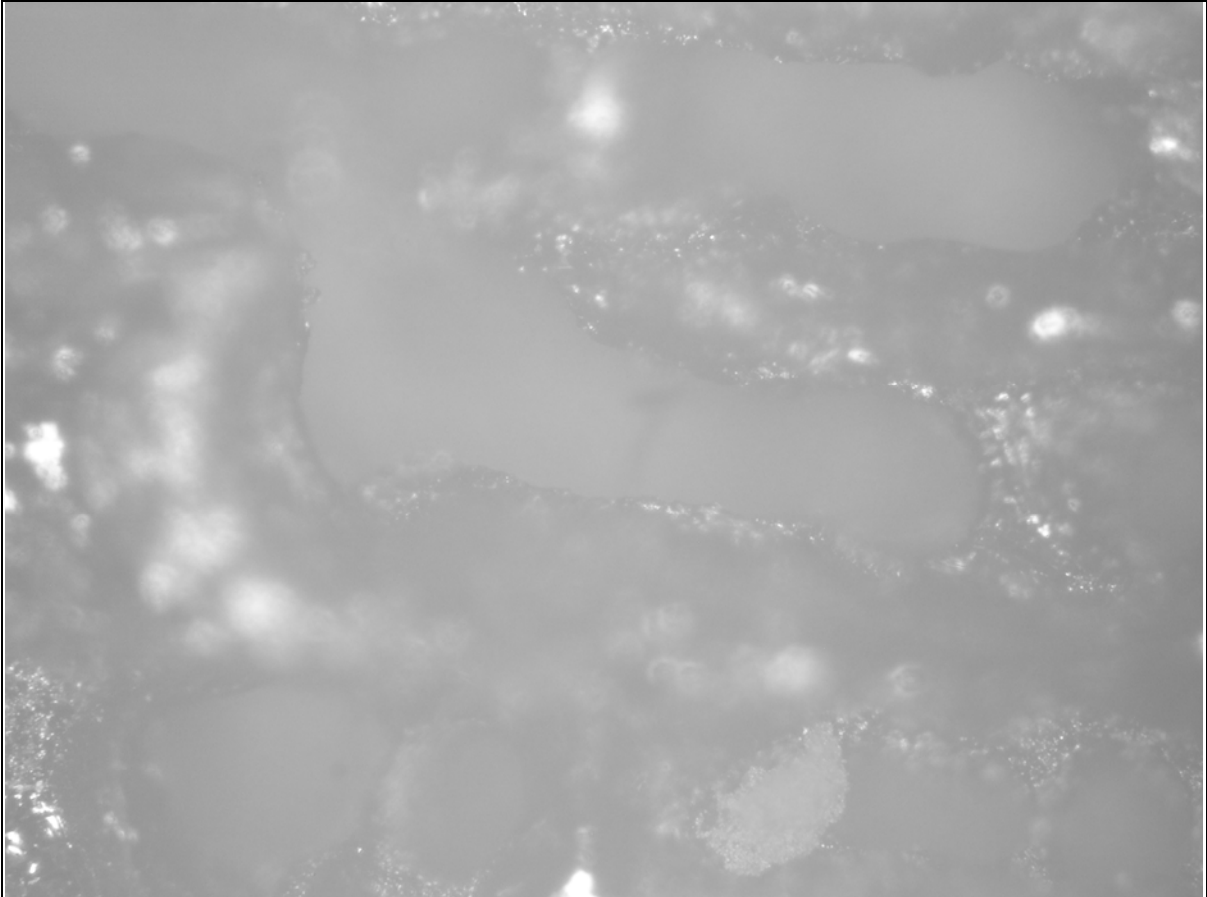


特徵:

平面稍微不平整，且有明確裂痕，但有燒結反應，結晶顆粒明顯且連續，故將功率設為目前最低 10% 為最佳。

圖 4-5. 功率 10% 速度 350($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	350	-65079	0.005	10%

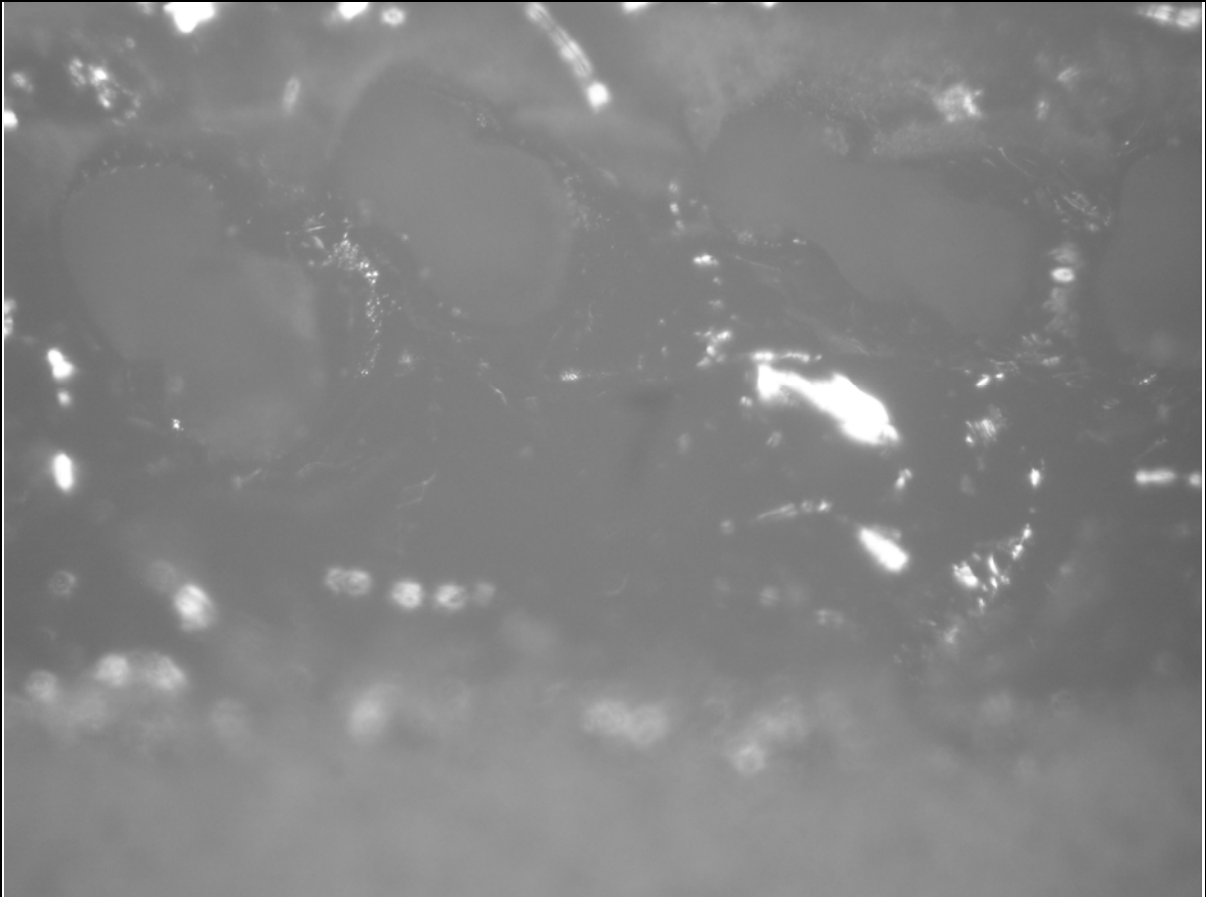


特徵:

表面明顯燒結過頭，可能是因線條間距過大，且移動速度加快有關。

圖 4-6. 功率 10% 速度 350($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	400	-65079	0.002	10%

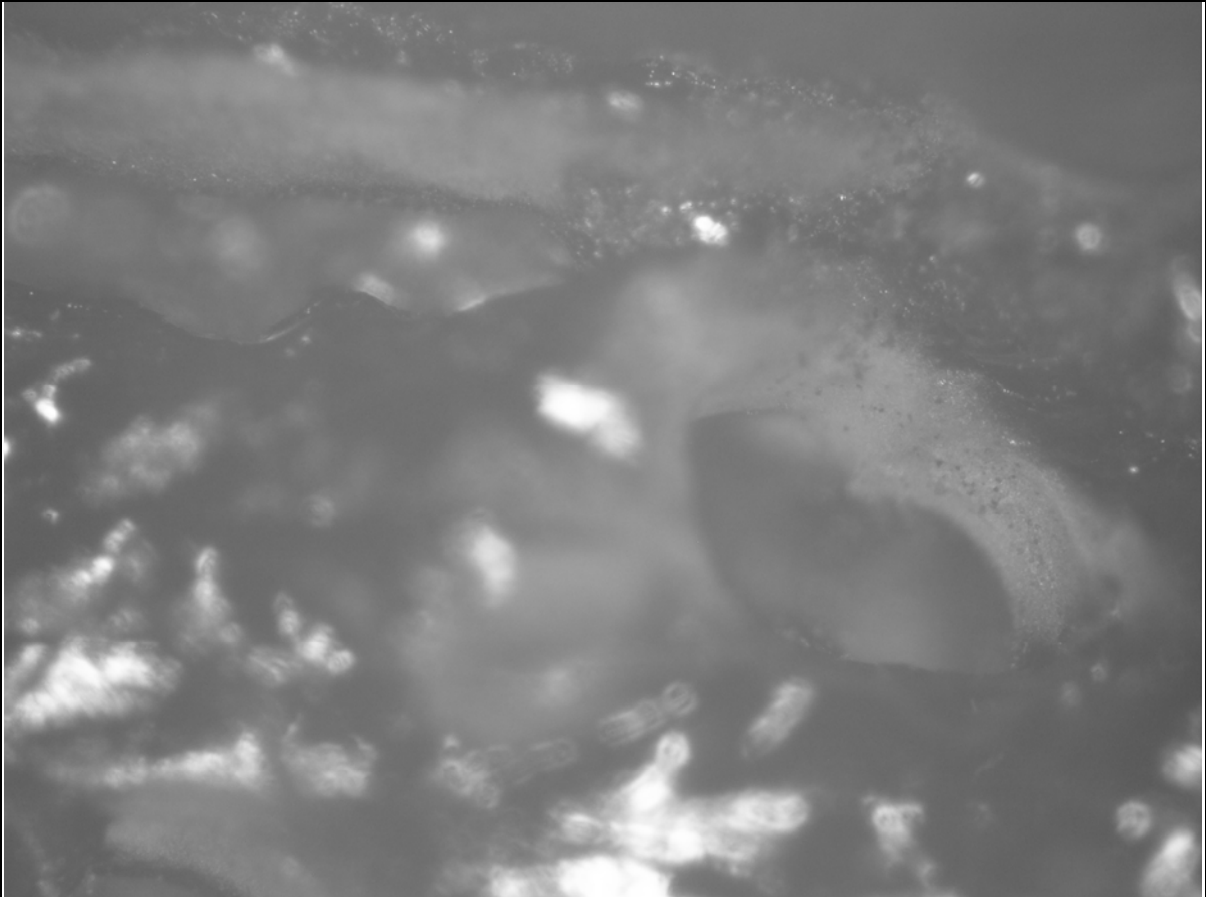


特徵:

表面有明顯燒結，但燒結結晶並不明顯，可能因速度加快有關，有些部分燒結並不完全。

圖 4-7. 功率 10% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	500	-65079	0.002	15%

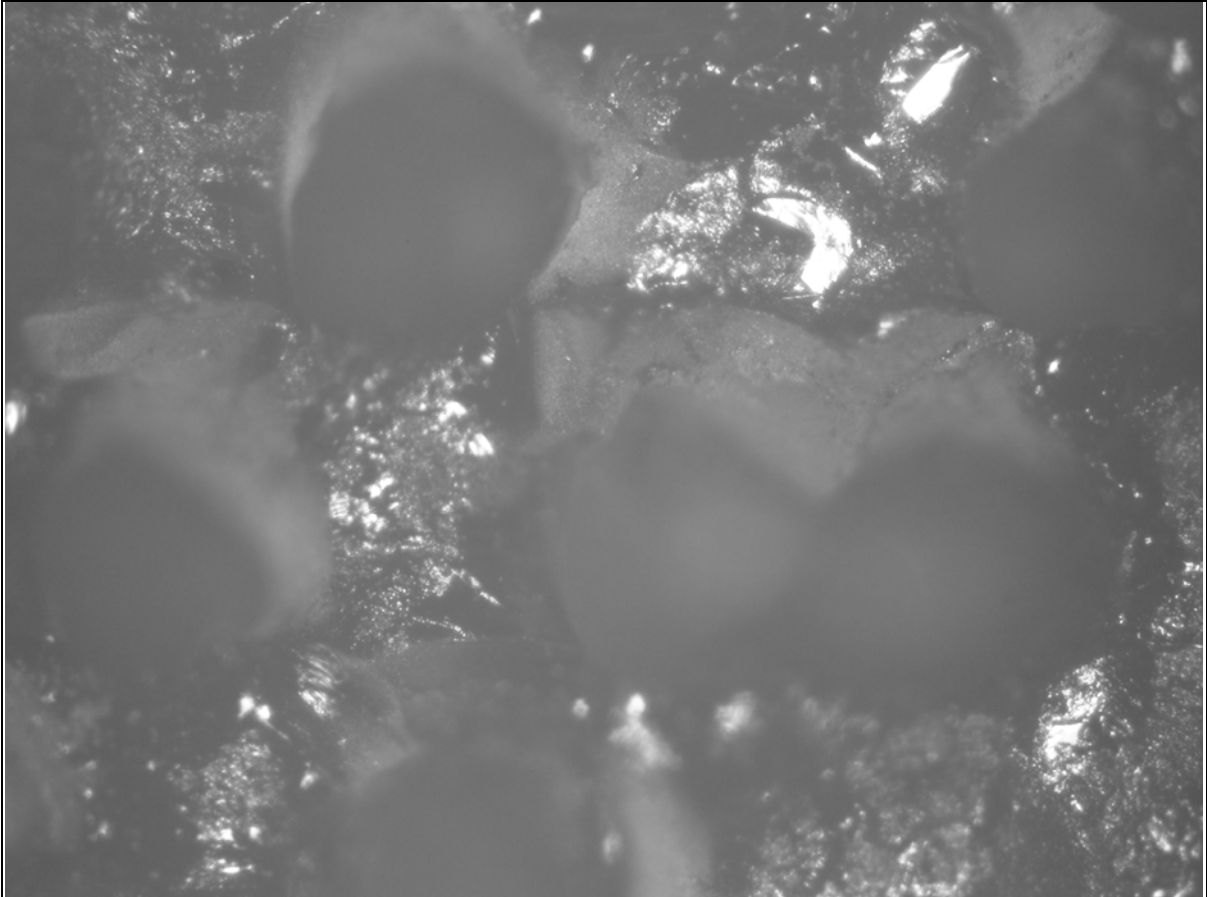


特徵:

表面有明顯燒結，可能因速度加快與功率提高有關，有些部分燒結並不完全。

圖 4-8. 功率 15% 速度 500($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	400	-65079	0.005	15%

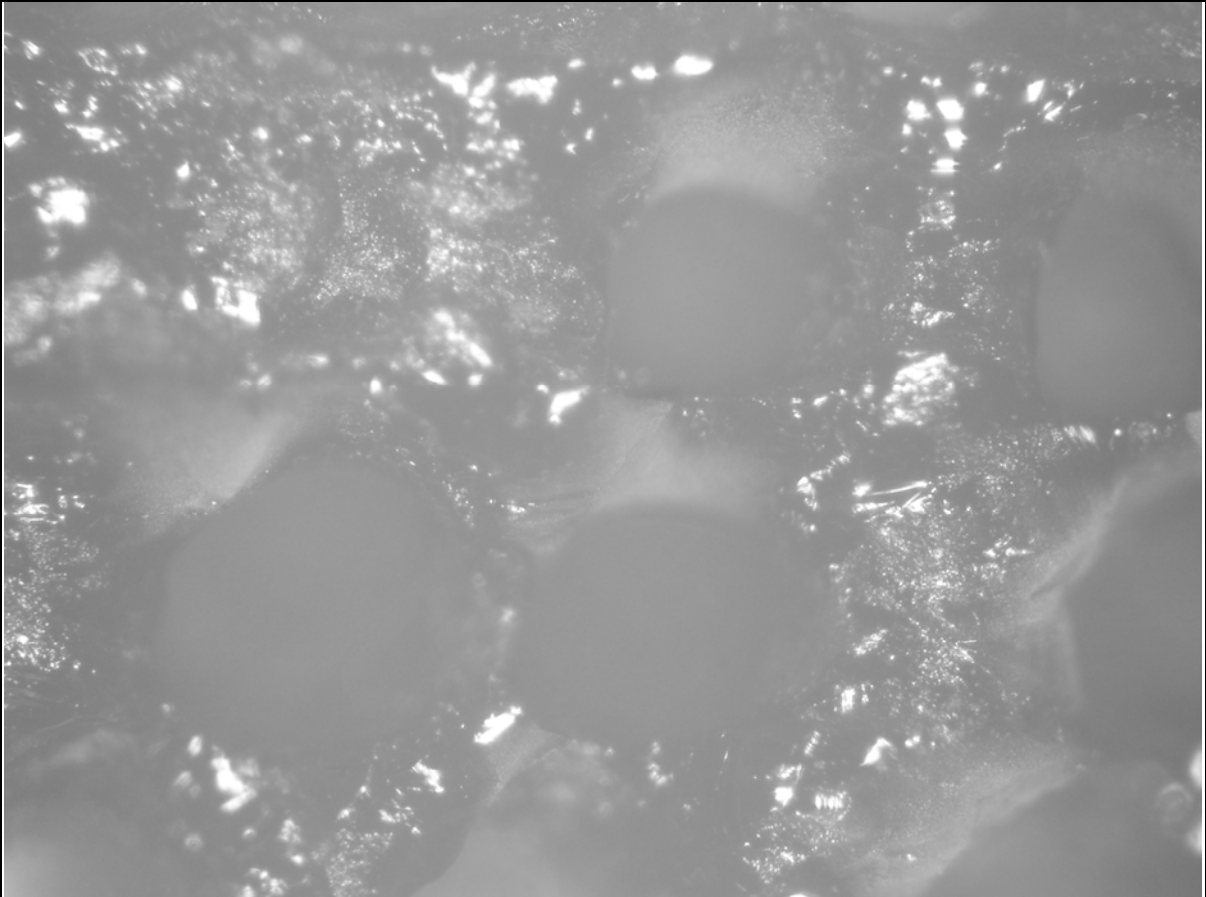


特徵:

表面有明顯燒結，但凹洞較多，可能是功率過大與鋪粉不均勻所造成。

圖 4-9. 功率 15% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	200	-65079	0.002	10%

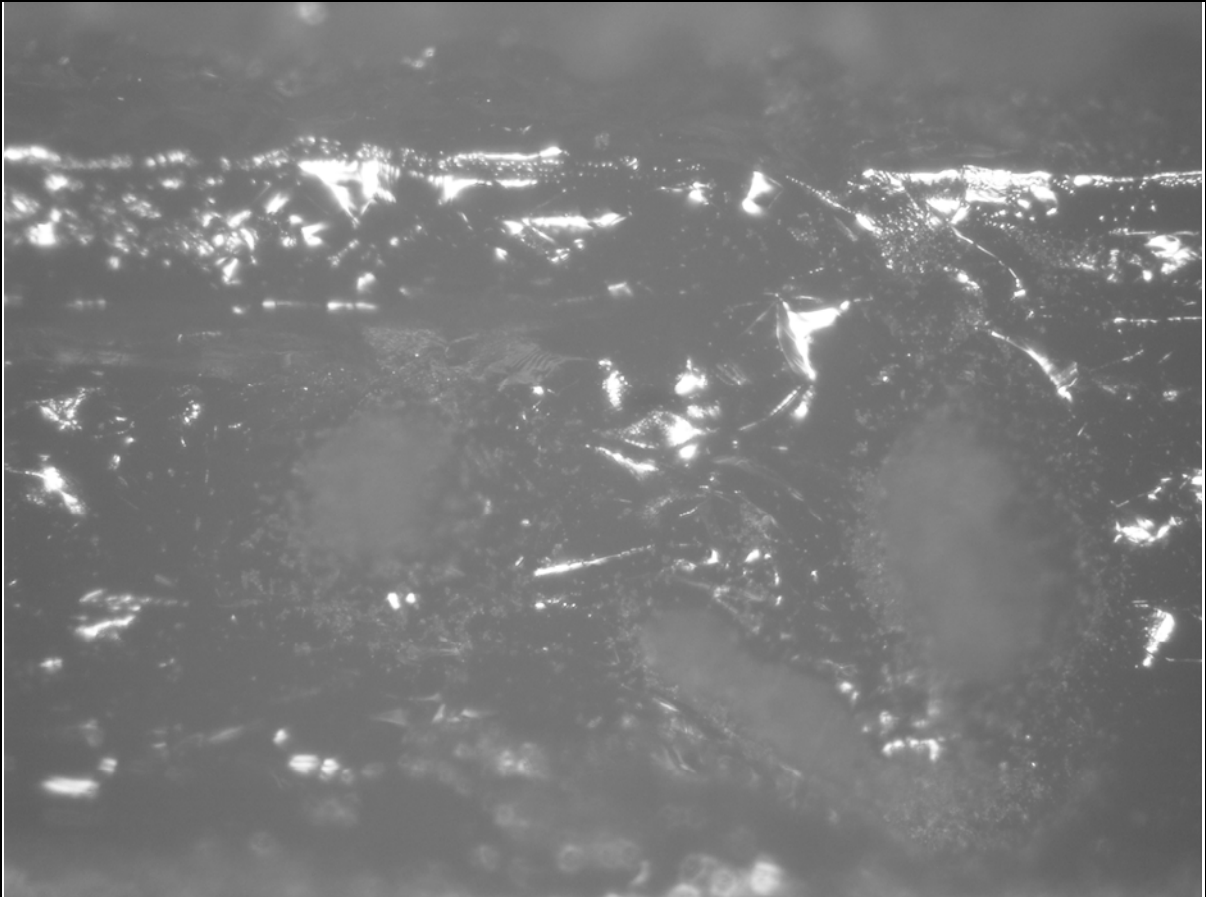


特徵:

表面有明顯燒結，凹洞大小較小，可能還是功率過大，移動速度較慢所造成。

圖 4-10. 功率 10% 速度 200($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	600	-65079	0.002	10%

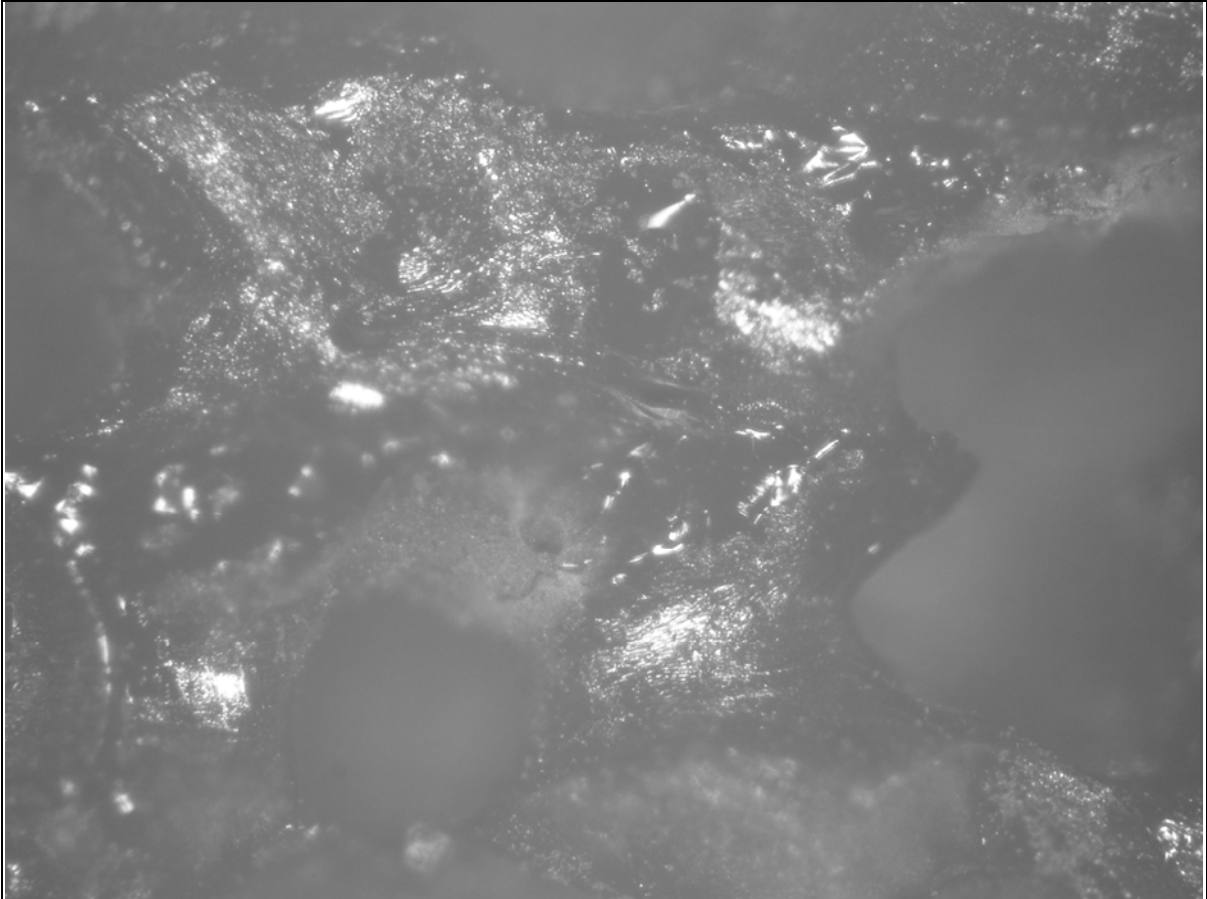


特徵:

表面有明顯燒結，凹洞大小較小，且燒結較為連續，可能因移動速度快幫助了功率過大的問題。

圖 4-11. 功率 10% 速度 600($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	600	-65079	0.005	15%



特徵:

有明顯燒結過頭痕跡，表面較凹凸不平，且部分凹洞過大。

圖 4-12. 功率 15% 速度 600($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	400	-65079	0.002	11%

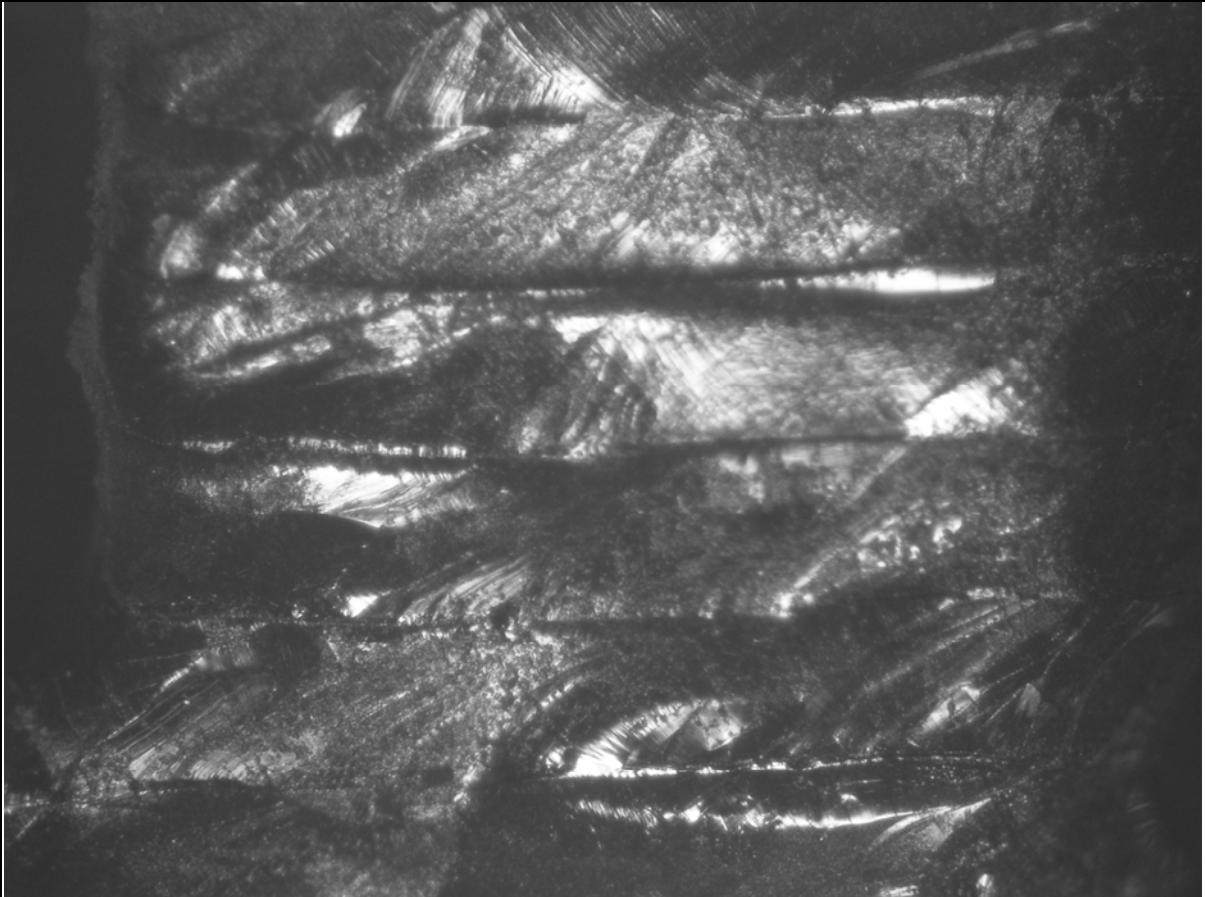


特徵:

功率為 11% 叫 10% 時大，所以燒結出來表面太過於不平整。

圖 4-13. 功率 11% 速度 400($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	5000	-50079	0.0025	20%

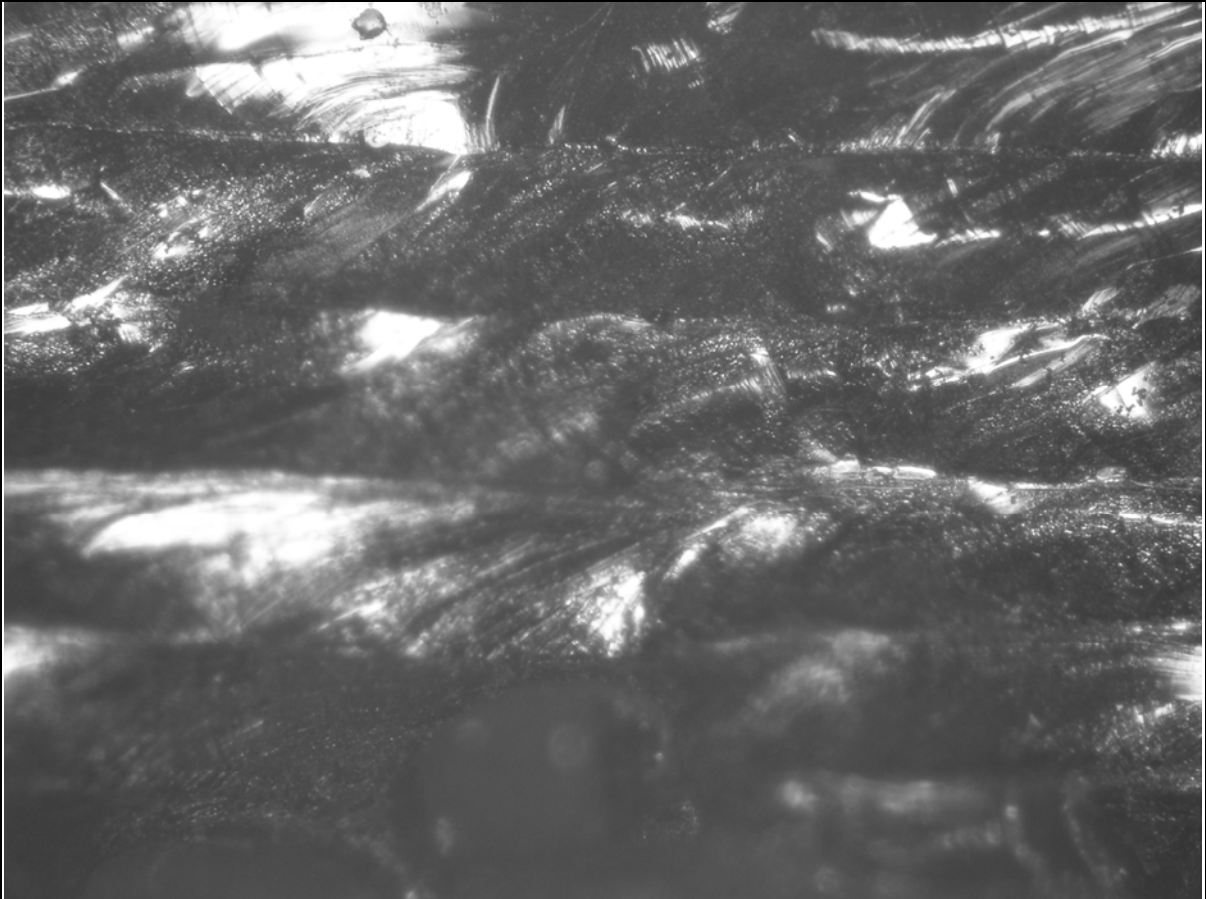


特徵:

離焦距離-50079 μm 速度 5000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，表面燒結較為平坦，間距 0.0025 時燒結出來接縫較為細緻。

圖 4-14. 功率 20% 速度 5000($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	6000	-50079	0.0025	20%



特徵:

離焦距離-50079 μm 速度 6000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，表面起伏較速度 5000($\mu\text{m}/\text{sec}$)大，間距 0.0025 時燒結出來接縫較為細緻。

圖 4-15. 功率 20% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	6000	-50079	0.0025	15%

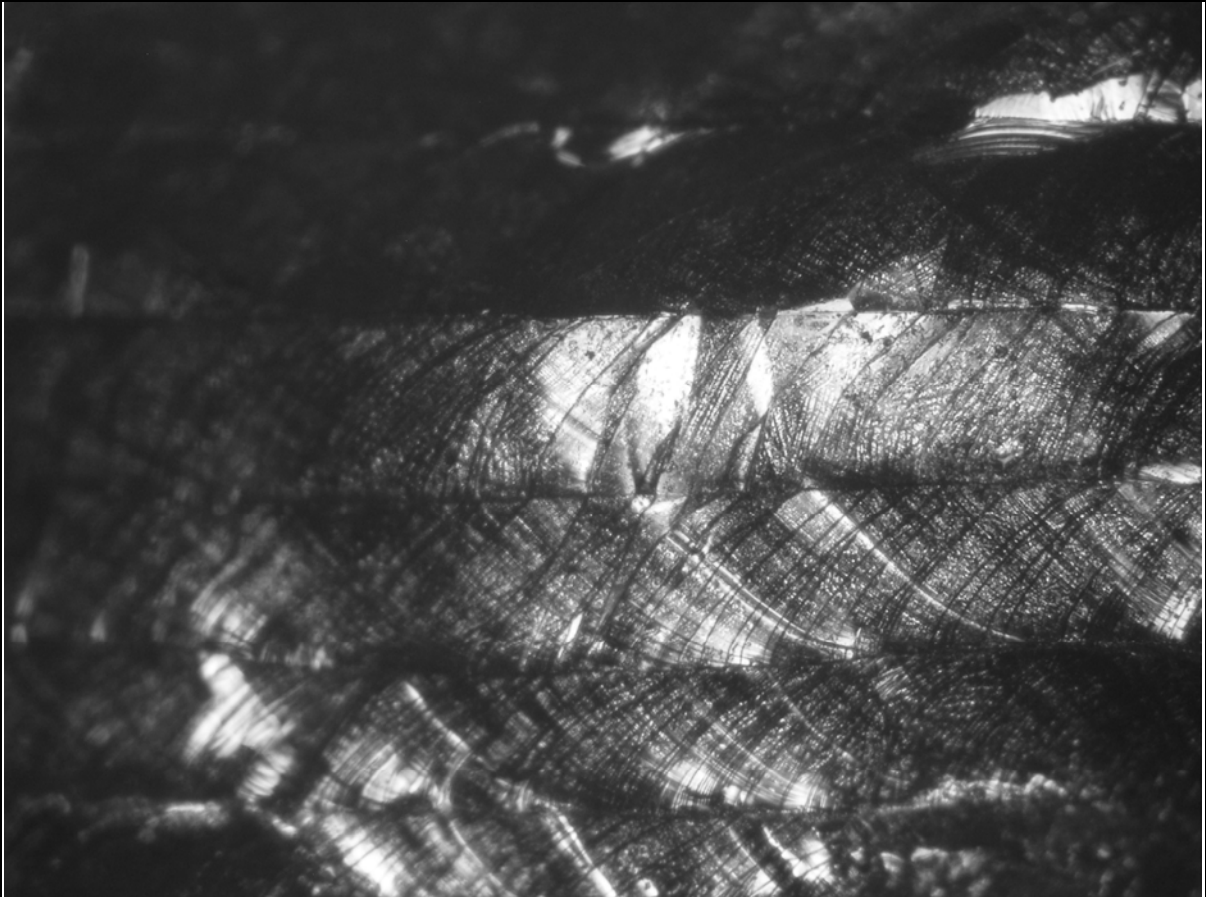


特徵:

離焦距離-50079 μm 速度 6000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，間距 0.0025 時燒結出來接縫較為細緻。

圖 4-16. 功率 15% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	6000	-48079	0.0025	25%

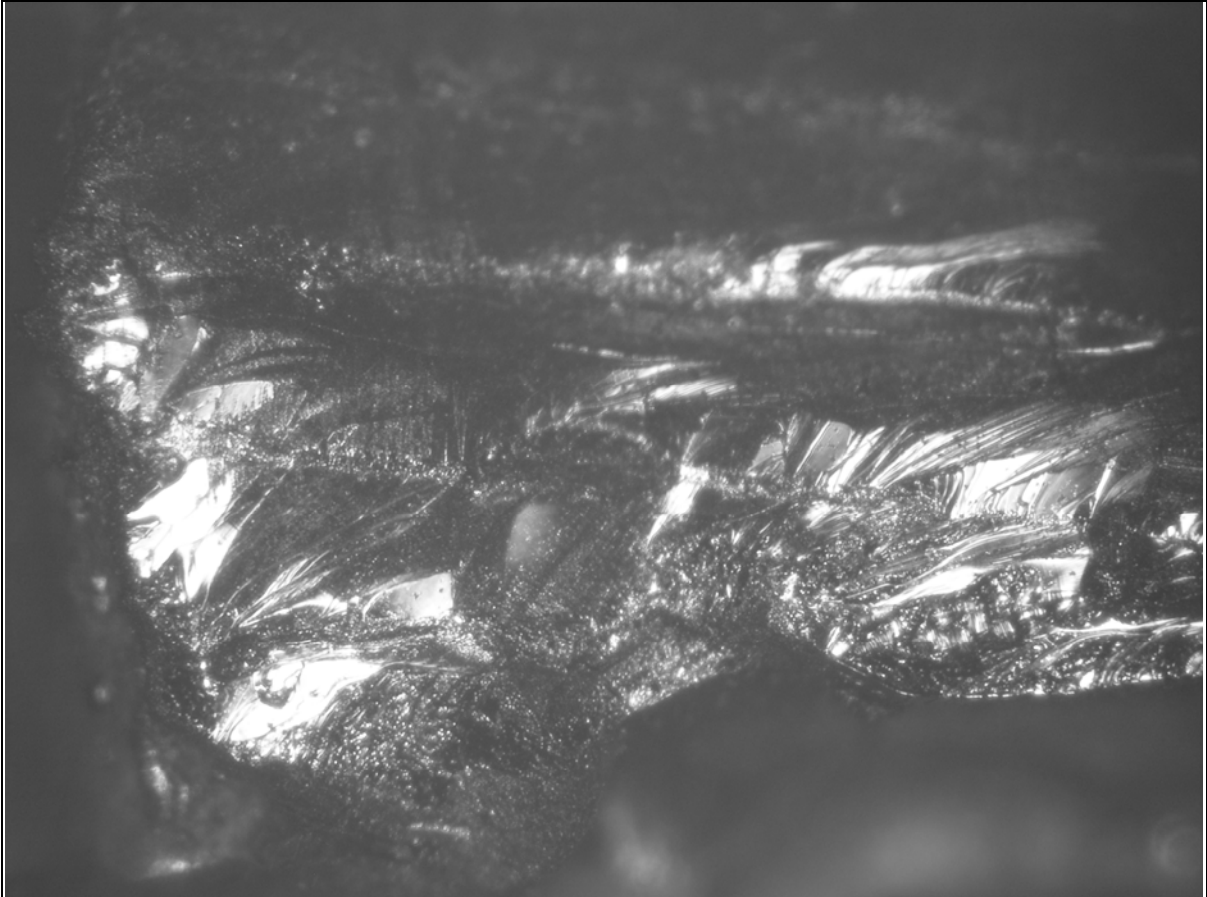


特徵:

離焦距離-48079 μm 速度 6000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，表面是目前實驗結果最為平坦，整體品質也是最佳，而掃描間距為 0.0025 時，燒結出來的接縫亦較為細緻。

圖 4-17. 功率 25% 速度 6000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	7000	-48079	0.0025	20%



特徵:

離焦距離-48079 μm 速度 7000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，表面形成較為塊狀，間距 0.0025mm 時燒結出來接縫較為細緻。

圖 4-18. 功率 20% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	7000	-44079	0.0025	25%



特徵:

離焦距離-44079 μm 時，所燒結出來的表面，有些部份才剛形成結晶的情形。

圖 4-19. 功率 25% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

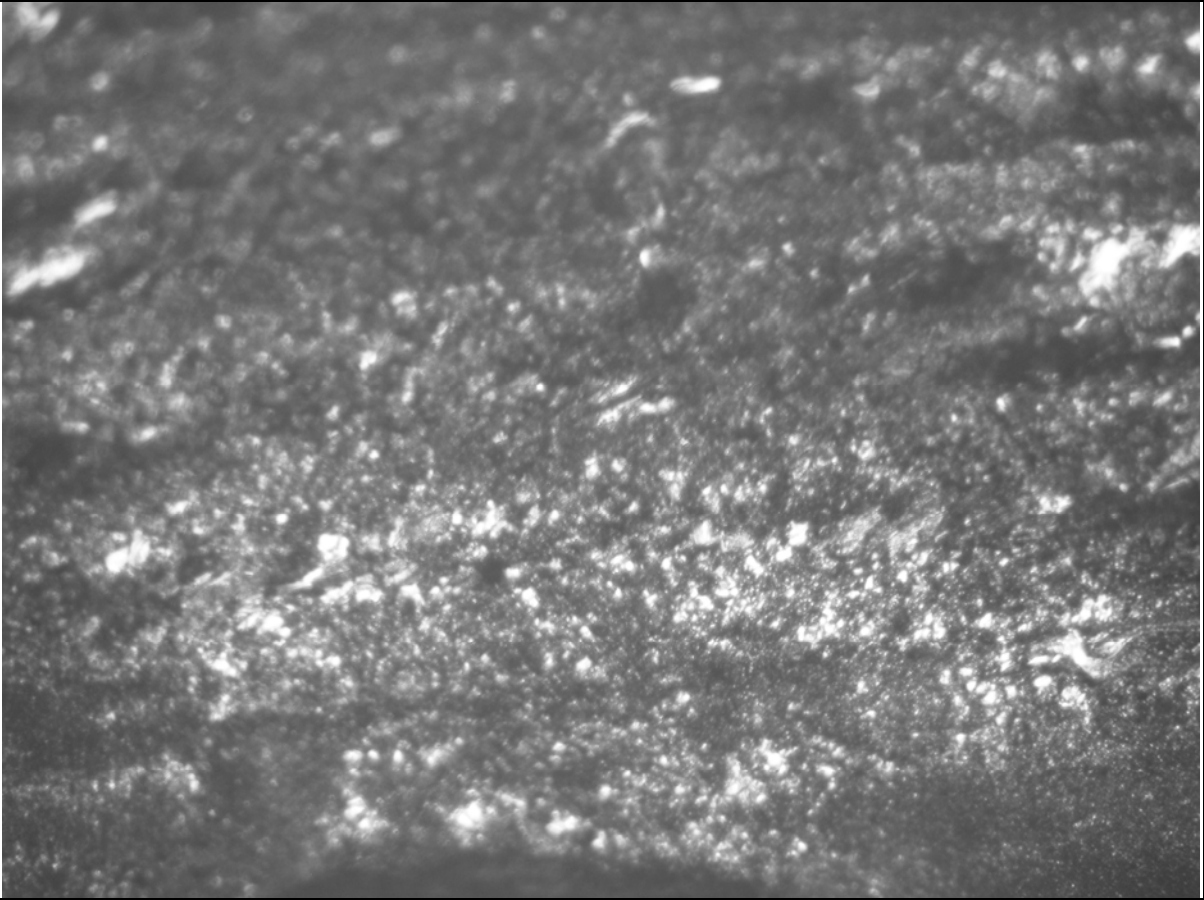
控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	7000	-44079	0.0025	23%
				
<p>特徵: 離焦距離-44079μm 速度 7000($\mu\text{m}/\text{sec}$)時，表面才剛有結晶小顆粒，功率再加大點也許會更好。</p>				

圖 4-20. 功率 23% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	7000	-40079	0.0025	23%

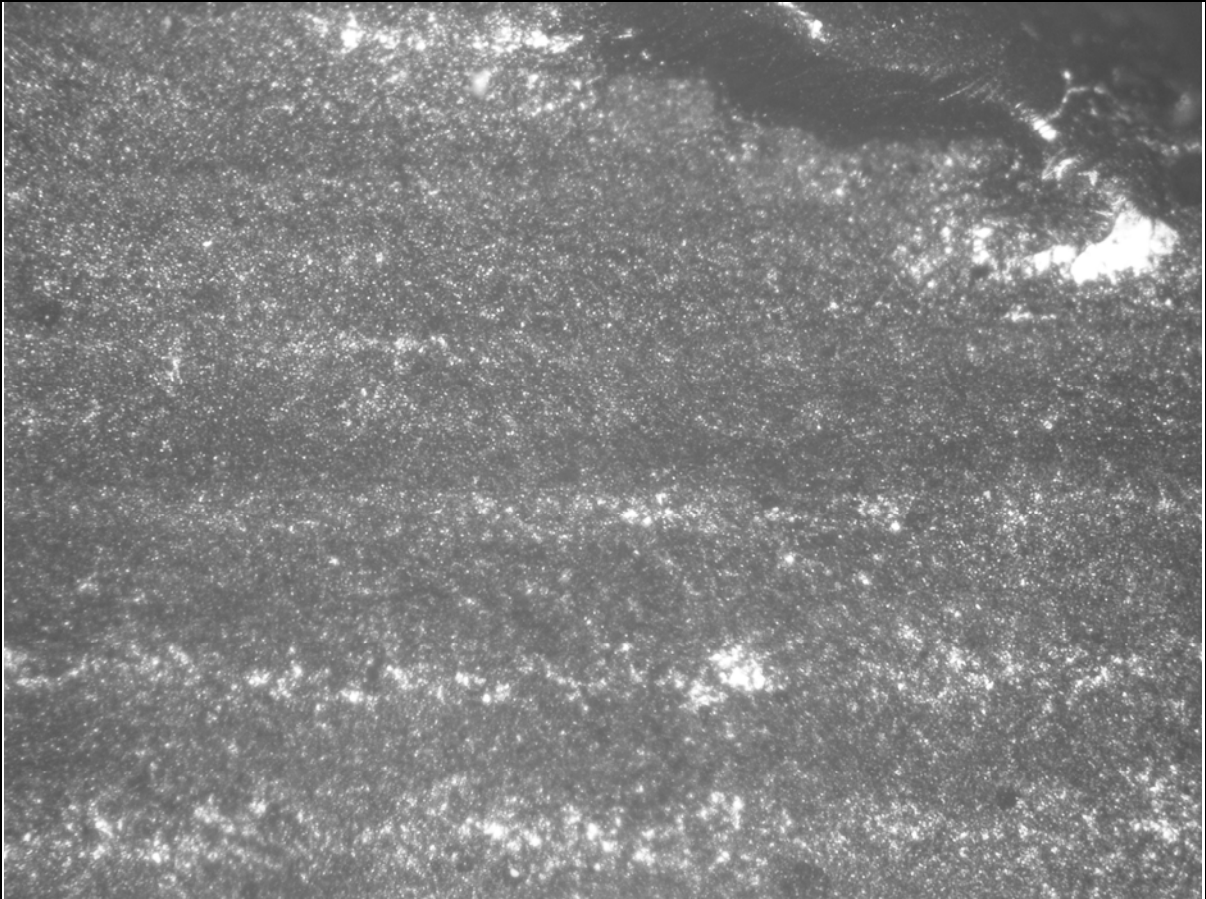


特徵:

離焦距離-40079 μm 速度 7000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，表面燒結顆粒較離焦距離-44079 μm 時更小，功率加大或聚焦距離縮小或可得到較佳結果。

圖 4-21. 功率 23% 速度 7000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	8000	-40079	0.0025	24%



特徵:

離焦距離-40079 μm 速度 8000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率提高 1%，表面燒結顆粒平均，但顆粒燒結未成功，表示功率還需要提高。

圖 4-22. 功率 24% 速度 8000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	8000	-40079	0.0025	20%

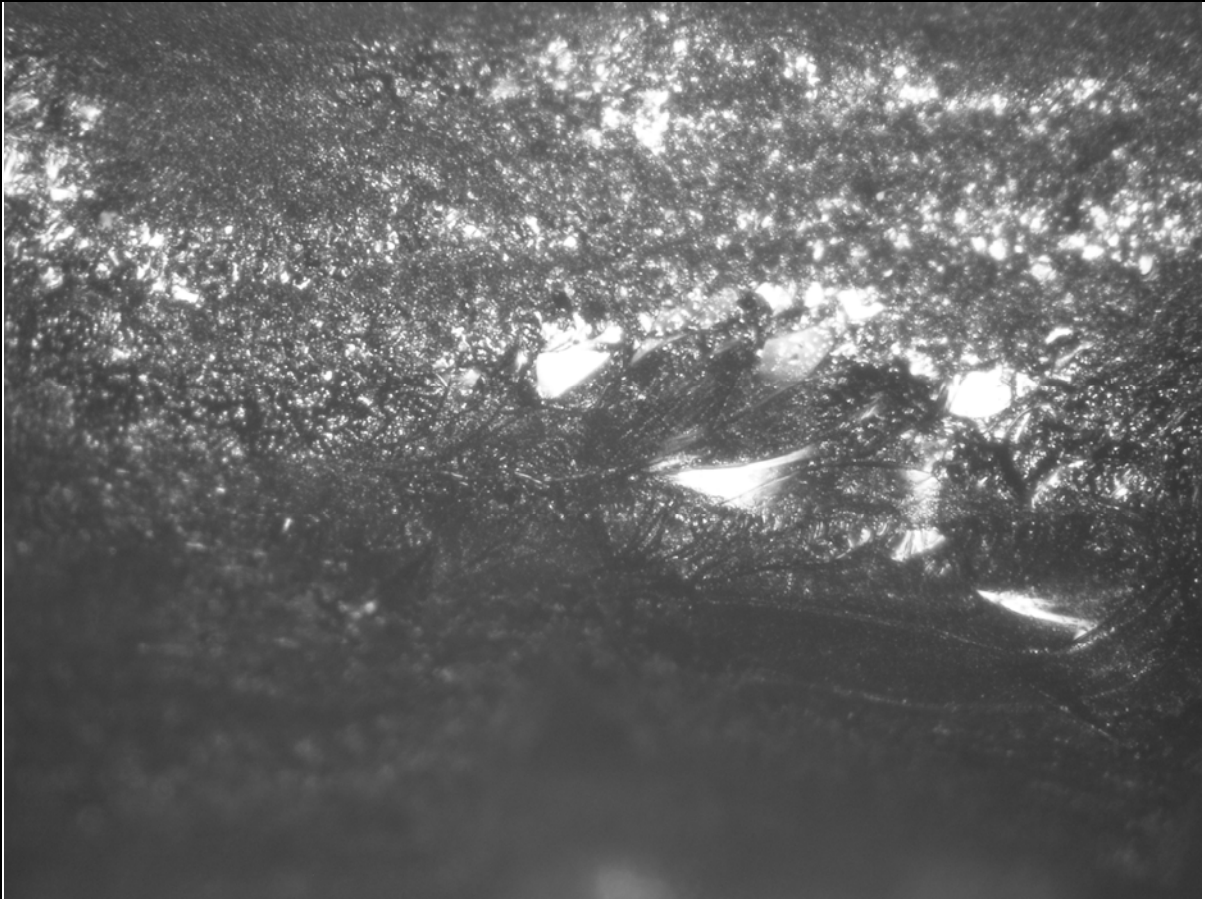


特徵:

離焦距離-40079 μm 速度 8000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率 20%時，表面凹凸較為明顯，部份粉末燒結並未完成。

圖 4-23. 功率 20% 速度 8000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	10000	-40079	0.0025	28%

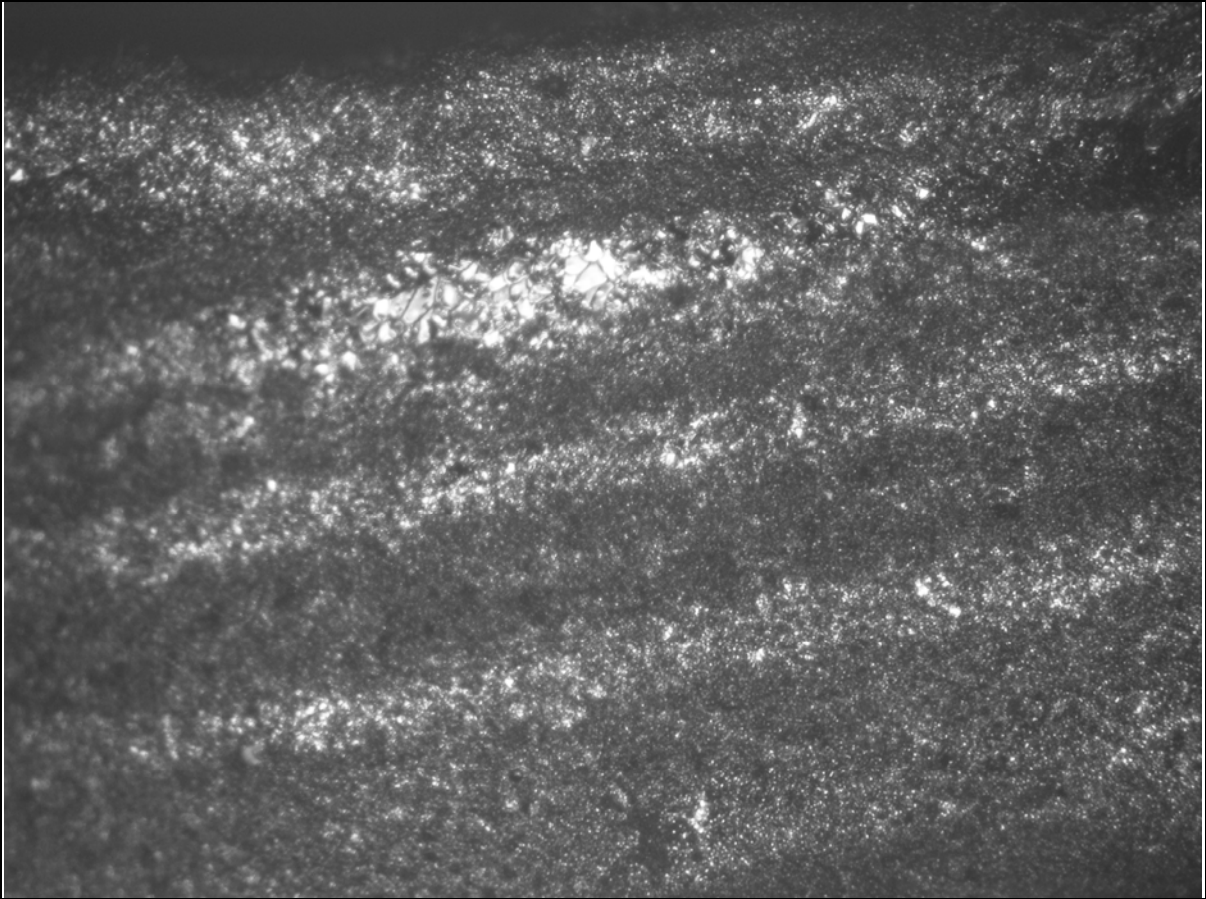


特徵:

離焦距離-40079 μm 速度 10000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率 28%，表面燒結較 20%時好，但雷射移動速度有點過快。

圖 4-23. 功率 28% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	10000	-35079	0.0025	28%



特徵:
離焦距離-35079 μm 速度 10000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率 28%，焦距提高雷射所打出來的直徑加大，所以能量降低，所燒結情況較差。

圖 4-24. 功率 28% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

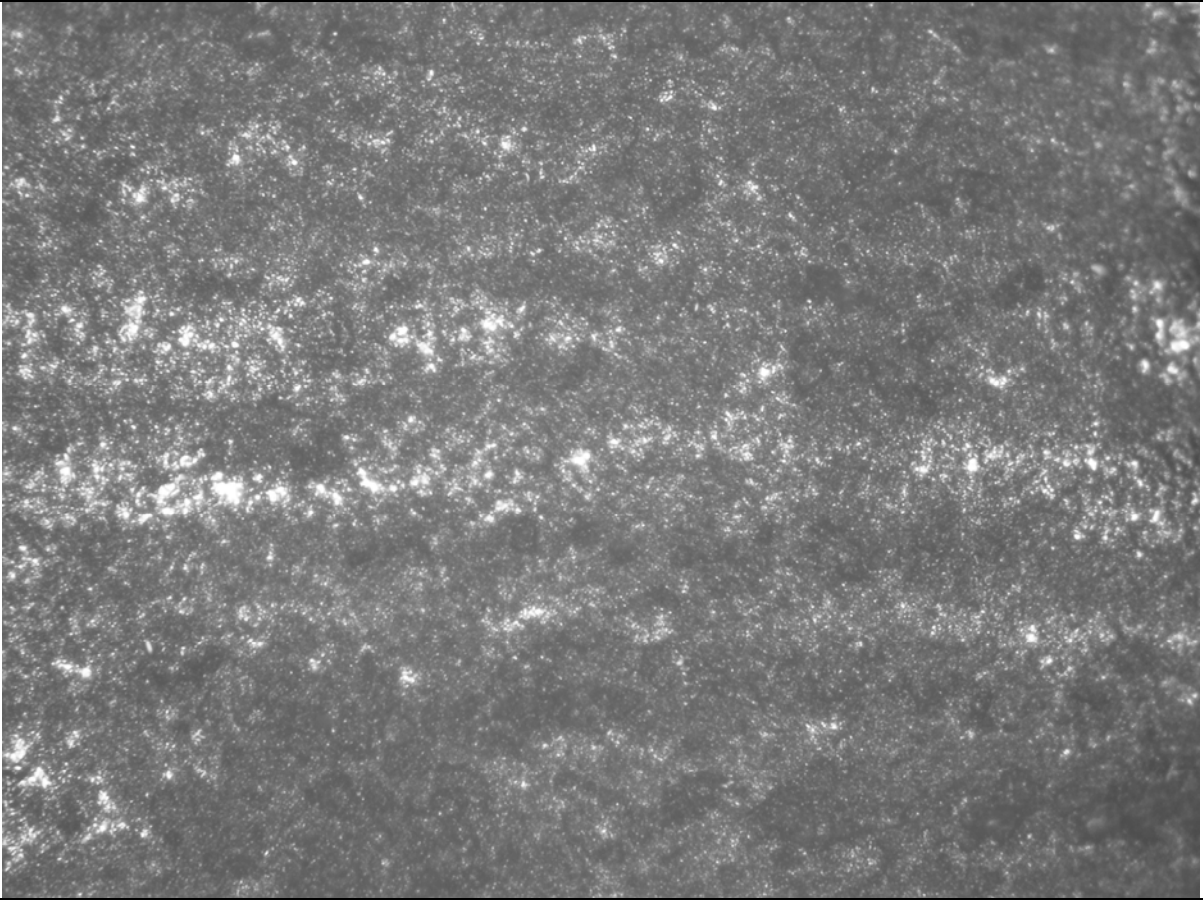
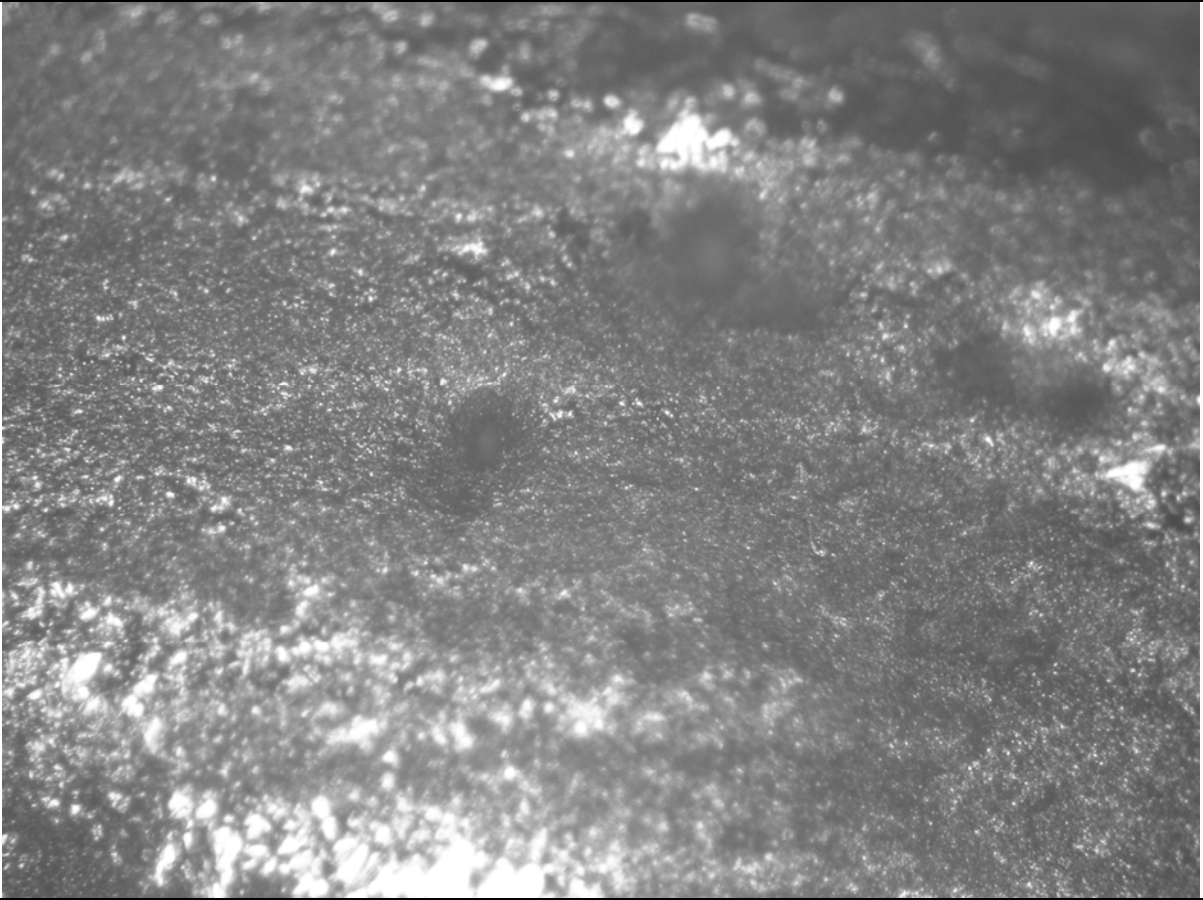
控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	10000	-35079	0.0025	25%
				
<p>特徵: 離焦距離-35079μm 速度 10000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率 25%比 28%時，燒結情形較為不好。</p>				

圖 4-25. 功率 25% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

控制因子				
	速度 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	焦距 (μm)	掃描間距 (mm)	最大功率 200(w) 之百分比
	10000	-30079	0.0025	25%



特徵:
離焦距離-30079 μm 速度 10000($\mu\text{m}/\text{sec}$)，功率 25%，表面有些部份還有鎳粉末的情形。

圖 4-26. 功率 25% 速度 10000 ($\mu\text{m}/\text{sec}$)雷射加工顯像圖

從上述的實驗結果，圖 4-17 有最佳的結果，其各參數的設定值為：

速度：6000($\mu\text{m}/\text{sec}$)
離焦距離：-48079 μm
線條間距：0.0025mm
功率：200w 之 25% ，即 50 w

五、結論

在雷射燒結過程中，鋪粉是否均勻將影響到燒結成型的品質，因其直接影響到雷射光束射在金屬粉末上的焦點位置，若金屬粉末鋪得不平時，其加工面上會有波形高低不一的情形，故在加工中的球成型，容易因粉末的不平而跳開。

已找出影響雷射燒結金屬粉末成型最終品質的主控製程參數及最佳設定值，對於面成型，也有初步的結果，但需做更多的各種顆粒大小的金屬粉末、不同的掃瞄速度及不同的掃瞄間距之實驗與分析，以便驗證目前初步的結論。

參考文獻

1. Jacobs, P. F. 1996, 1999, "Stereolithography and other RP&M Technology, from Rapid Prototyping to Rapid Tooling", SME Press, New York.
2. 羅仁權，鄒治華，謝正一，周修宏，2002年2月，"快速模具技術的發展現況與未來技術"，機械月刊，pp.162-176。
3. 郭啟全，2002年7月，"快速模具技術與應用實例"，機械技術雜誌，pp.196-206。
4. 黃國顏，鍾宜達，陳務光，2002年9月，"金屬樹脂快速成型法製模技術之探討"，機械月刊，pp.400-404。
5. Luo, R. C., Tzou, J. H., and Chang, Y. C., December 2001, "Desktop Rapid Prototyping System with Supervisory Control and Monitoring Through Internet", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 4, pp.399-409.
6. 羅仁權，2003年11月，"快速直接金屬模具研製應用快速成型計數之研發"，國科會九十一年度自動化學們整合型研究計畫成果發表會。
7. 鄭正元，詹朝基，"快速原型加工"，教育部87學年度製造科技領域教學課程網路多媒體教材計劃，pp.92-103。
8. 鄭正元，汪家昌，1999年，"快速原型技術至快速模具技術之發展"，模具技術成果暨論文集，pp.207-212。
9. 劉福興，湯華興，2003年12月，"金屬快速熔結成型計數之研究"，第十二屆機械工程研討會，pp 953-957。
10. 張智仁，黃聖杰，2002年2月，"利用快速原型系統製作快速模具"，機械月刊，pp.211-220。
11. 林榮信，林益良，2002年2月，"快速原型切層原理及軟體研究"，機械月刊，pp.177-191。
12. 沈昌和，鄭正元，黃育嘉，2003年12月，"動態光罩技術研發與其於微小3D元件之製作"，第十二屆機械工程研討會，pp 721-728。
13. 汪家昌，謝明哲，2003年12月，"微快速原型機製作技術開發先期研究"，第十二屆機械工程研討會，pp 987-992。
14. 張仲卿，2003年12月，"微米級快速原型機光源系統與成型條件最佳化之研究"，國科會九十一年度自動化學們成果發表會。
15. Zhang, W., Leu, M. C., Ji, Z., and Yan, Y., June 1999, "Rapid Freezing Prototyping with Water", Journal of Materials and Design, Vol. 20, pp. 139-145.
16. Leu, M. C., Zhang, W., and Sui, G., 2000, "An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freeze Prototyping", Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 1.
17. Zhou, J. and He, Z., "A new Rapid Tool and Its Binder Study", Journal of Rapid prototyping, Vol. 5, No. 2, pp. 82-88,.
18. Zhou, J. and He, Z., 1998, "Rapid Pattern Based Powder Sintering Technique and Related Shrinkage Control", Journal of Materials and Design, Vol. 19, pp. 241-248.
19. Kathuria, Y. P. 1996, "Rapid Prototyping: An Innovative Technique for Microfabrication of Metallic Parts", International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science, IEEE, pp.41-47.
20. Kathuria, Y. P. 1997, "Selective Laser Sintering of Metallic Powder for Microfabrication Technology", International Symposium on Micro Mechatronics and Human Science, IEEE, pp.105-109.
21. Kathuria, Y. P. 1998, "Laser Microstructure of Composite Powder Materials", Seven

- International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, pp.59-65.
22. Tang, Y., Loh, H. T., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Lu, L., Wang, X., Sep. 2003, "Direct Laser Sintering of a Copper-Based Alloy for Creating Three-Dimensional Metal Parts", *Journal of Materials Processing Technology*, V140; n 1-3 SPEC; pp368-372.
 23. Simchi, A. and Pohl, H., Oct. 2003, "Effects of Laser Sintering Processing Parameters on the Microstructure and Densification of Iron Powder", *Materials Science and Engineering A*, V 359;n 1-2; pp119-128.
 24. Morgan, R., Sutcliffe, C.F., and O'Neil, W., 2001, "Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd:YAG laser re-melted pre-placed powder beds", *Rapid Prototyping Journal*, Volume 7, Number 3, pp. 159-172.
 25. Tolochko Nikolay, Mozzharov Sregei, Laoui Tahar, and Froyen Ludo, 2003, "Selective laser sintering of single-and two-component metal powders", *Rapid Prototyping Journal*, Volume 9, Number 2, pp68-78.
 26. Hsin-Te Liao and Jie-Ren Shie, 2007, "Optimization on selective laser sintering of metallic powder via design of experiments method ", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 156-162.

明新科技大學 98 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 checked="" 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"/> 通識教育部 執行系別： 機械工程系 計畫主持人： 廖信德 職稱：副教授兼系主任 計畫名稱： 光纖雷射應用於金屬粉末燒結可行性之探討 計畫編號： MUST-95-機械-05 計畫執行時間： 98年1月1日至98年9月30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>瞭解整個快速成型與快速模具的技術及其發展趨勢。</u> 2. 對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>製作金屬快速成型機台的初步經驗，學得機、光、電的整合應用技術</u> 3. 其他方面之具體成效： <u>提供開發金屬快速成型機有關成型材料與機台設計的專業技術。</u> </td> </tr> <tr> <td style="width: 10%; 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：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年__月__日 3. 該計畫是否有衍生產學合作案、專利、技術移轉等，請說明： </td> </tr> </table>	教學方面	1. 對於改進教學成果方面之具體成效： <u>瞭解整個快速成型與快速模具的技術及其發展趨勢。</u> 2. 對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>製作金屬快速成型機台的初步經驗，學得機、光、電的整合應用技術</u> 3. 其他方面之具體成效： <u>提供開發金屬快速成型機有關成型材料與機台設計的專業技術。</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：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年__月__日 3. 該計畫是否有衍生產學合作案、專利、技術移轉等，請說明：
教學方面	1. 對於改進教學成果方面之具體成效： <u>瞭解整個快速成型與快速模具的技術及其發展趨勢。</u> 2. 對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>製作金屬快速成型機台的初步經驗，學得機、光、電的整合應用技術</u> 3. 其他方面之具體成效： <u>提供開發金屬快速成型機有關成型材料與機台設計的專業技術。</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：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年__月__日 3. 該計畫是否有衍生產學合作案、專利、技術移轉等，請說明：				
成果自評	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;">計畫預期目標：</td> <td style="padding: 5px;"> 計畫執行結果： 獲得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> </td> </tr> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;">其它具體成效：</td> <td style="padding: 5px;"> (1) 找出影響製作金屬工件品質之製程參數。 (2) 可發表研究成果於相關學術論文之研討會及期刊。 (3) 參與之學生學會如何應用實驗計畫法來分析製程參數的影響及最佳設定值。 <div style="text-align: right;">(若不敷使用請另加附頁繕寫)</div> </td> </tr> </table>	計畫預期目標：	計畫執行結果： 獲得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>	其它具體成效：	(1) 找出影響製作金屬工件品質之製程參數。 (2) 可發表研究成果於相關學術論文之研討會及期刊。 (3) 參與之學生學會如何應用實驗計畫法來分析製程參數的影響及最佳設定值。 <div style="text-align: right;">(若不敷使用請另加附頁繕寫)</div>
計畫預期目標：	計畫執行結果： 獲得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>				
其它具體成效：	(1) 找出影響製作金屬工件品質之製程參數。 (2) 可發表研究成果於相關學術論文之研討會及期刊。 (3) 參與之學生學會如何應用實驗計畫法來分析製程參數的影響及最佳設定值。 <div style="text-align: right;">(若不敷使用請另加附頁繕寫)</div>				