

雷射輔助金屬直接堆積製程研發與應用

Process Development and Application of Laser-aid Direct Metal Deposition

計畫編號：NSC 90-2216-E-002-040

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：陳 鈞 台灣大學材料科學與工程研究所

參與人員：吳憲政、陳雅嵐 台灣大學材料科學與工程研究所

摘要

雷射輔助金屬直接堆積製程，係應用雷射層加工披覆技術進行製作三維金屬元件。此製程可使用於任何表面上或局部區域，甚至可利用不同金屬之混合粉末來改變工件表面或局部特性。本研究在於設計及製作 5KW CO₂ 雷射機之同軸披覆噴嘴，並嘗試應用於 IN738LC 氣渦輪機葉片之再生處理。實驗結果顯示，單送粉噴嘴雷射披覆處理過程具有方向性，且三度空間成形性較差，而雙送粉噴嘴則較無方向性問題，其三度空間成形性較佳。IN625 及 Waspaloy 粉末可用於 IN738LC 材料之雷射披覆處理，唯 Waspaloy 粉末之披覆鋁道之高度不得超過 3mm，以免鋁道產生龜裂。鋁道介面以及披覆層間的氣孔，可藉由雷射披覆處理過程調整鋁道氣體保護程度、減少粉末輸送量與輸送氣體流量及增加雷射功率等參數調整，達到降低鋁件之氣孔率。

關鍵詞：金屬直接堆積、雷射披覆、再生處理、渦輪葉片

1、前言

雷射輔助金屬直接堆積製程係利用雷射同軸或近似的同軸之輸送粉方式，使粉末未達工件熔池表面前吸收雷射能量形成半熔融或全熔融狀態，而至工件時形成冶金鍵結。此種應用層加工方式，配合多軸 CNC 機台，可進行製作三維金屬元件成形製作或鋁補[1]。應用雷射披覆加工技術適合少量多樣化組件之快速成形製造及高單價零組件之損傷再生[1]。火力電廠氣渦輪機熱段組件一般由鎳基超合金所製成，其中 IN738LC 為動葉及部分靜葉之主要組成材料。葉片經長時間運轉，由於高溫腐蝕及熱疲勞作用易造成葉片龜裂及損傷。IN738LC 葉片材料為析出硬化型高鈦鋁含量合金，鋁補過程易引起鋁道凝固熱裂、熱影響區液態龜裂及鋁後熱處理之應變時效龜裂，為避免上述鋁補龜裂之最佳解決方法，即以低熱輸量之雷射輔助金屬直接堆積(雷射層加工披覆)製程進行 IN738LC 葉片之雷射再生處理。本研究主要目的為設計與製作 5KW CO₂ 雷射機之同軸披覆噴嘴，進行噴嘴特性及不同批覆參數測試，並應用於 IN738LC 葉片之層加工成形鋁補。實驗過程並進行披覆鋁件之龜裂分析、鋁件之機械性能測試及探討披覆鋁道與披覆界面間氣孔之降低方法。

2、實驗方法

實驗使用多軸 CNC 之 5KW 二氧化碳雷射配合同軸披覆噴嘴及 Miller 機械式送粉機進行雷射層加工披覆試驗，披覆處理過程採用氬氣為保護氣體，氬氣為粉末輸送氣體。披覆層加工處理之單層熱輸入量為 180~250J/mm。披覆測試所用之噴嘴為自製之單

送粉與雙送粉共軸噴嘴，這些噴嘴設計係參考國外產品並經多次改良，為一符合本實驗室現有 RS-850 雷射機型之特殊噴嘴。測試過程並以高解析度之數位 CCD 進行披覆噴嘴測試記錄與觀察。

在實驗中所使用的材料包括 IN738LC 試片及實體葉片，板材尺寸為 10cm×4.5cm×3mm。IN738LC 試片為切取自報廢的氣渦輪葉片材料，其化學成分(wt%)為 16Cr、8.5Co、3.4Ti、3.4Al、2.6W、1.7Ta、1.7Mo、0.9Nb、0.11C、0.1Zr 其餘為 Ni。實驗板材經 1120°C/2h/AC + 850°C /16h/AC 真空熱處理後，再以 IN738LC、IN625 及 Waspaloy 粉末進行雷射披覆層加工實驗。製程評估方面，使用 SEM 進行雷射堆積層之微成分與可能生成缺陷之探討，特別是在堆積層與基材介面成分變化與介面區之混合或稀釋程度。此外，亦進行雷射披覆層加工實體葉片之再生處理。機械性質測試方面，主要包含衝擊(Subsize, 2.5mm thick)試驗與微硬度量測，做為評估的項目。

3、結果與討論

3.1 實驗母材之金相組織

IN738LC 葉片材料經 1120°C /2h/AC + 850°C /16h/AC 真空熱處理後其光學金相顯微組織照片如圖 1(a)所示，圖中顯示基地係由初析 γ' 相(粗大塊狀)、微細 γ' 相(基地析出相)及晶界析出之碳化物(MC 及 M₂₃C₆)所構成。此合金強化機構為 γ' 相析出強化、晶界碳化物之析出強化及各種合金元素之固溶強化[2]，經 EDS 成分分析 γ' 相與基地的成分都以 Ni、Cr 為主，但 γ' 相多了 Al、Ti 的含量。IN738LC 葉片材料經常時間使用後 MC 碳化物與 γ 相產生反應而退化為 γ' 相與 M₂₃C₆ (針狀)如圖 1(b)所示，且其隨時間增加其 γ' 相逐漸粗大化。

3.2 雷射披覆處理噴嘴之設計與測試

針對 IN738 超合金葉片之鋁補為防止鋁件鋁補過程之龜裂分別設計單送粉及雙送粉雷射披覆處理噴嘴進行鋁補測試，噴嘴設計概圖如圖 2 所示。兩種噴嘴經由送粉測試檢視其側向粉末濃度影像分佈分別如圖 3 所示，由圖 3(a)可知單送粉噴嘴其粉末發散程度因不同送粉參數自噴嘴出口以高斯分佈方式呈現 45~70 度之發散角，且其發散程度因粉末粒度之差異而有所變化。較粗之粉末粒度因重量較重，粉末輸送時與管壁產生摩擦，導致粉末自噴嘴出口產生較大之發散角；較細粉末因重量較輕，粉末輸送較易產生流體化，其發散角較小。圖 3(b)顯示雙送粉噴嘴則

較具有不同之粉末流動模型，輸送之粉末分別以10~25度之發散角相交於噴嘴出口7~15mm之位置，超過此位置其粉末產生明顯之發散而降低披覆處理之堆積效率。

分別比較兩種送粉噴嘴粉末輸送與雷射交互作用情形如圖4所示，由圖顯示單送粉噴嘴雷射披覆處理過程具有方向性（圖4(a)），且三度空間成形性較差。而雙送粉噴嘴則較無方向性問題（圖4(b)），其三度空間成形性較佳[3]，圖5為雷射層加工披覆處理照片。圖6(a)與(b)分別顯示以兩種噴嘴完成17-4PH析出硬化型不銹鋼材料3-D成型之外觀照片。

3.3 雷射披覆處理參數對氣孔之影響

IN738LC 板材分別以 IN738、IN625 及 Waspaloy 粉末進行 3-D 雷射披覆處理，測試披覆處理參數為：熱輸入量 180~250J/mm、送粉轉盤轉速 1.5~2.5rpm、粉末輸送氣體流量氬氣 1~5lpm、保護氣體流量氬氣 5~12lpm、氬氣 8~20lpm。

雷射披覆處理銲道產生氣孔與銲道氣體保護程度、粉末輸送氣體流量及雷射能量大小有密切關係，經適當調整銲道保護氣體流量、減少粉末輸送量與輸送氣體流量及增加雷射功率（並提升雷射披覆速度及降低雷射能量密度），可得到較少氣孔之披覆銲道試片，如圖7所示（410 不銹鋼披覆銲件）。IN738LC 葉片材料選用較佳之雷射披覆處理參數以 IN625 粉末進行披覆處理後，其外觀及披覆層光學金相顯微組織照片如圖8(a)及圖8(b)所示，由適當控制披覆參數可得到微量氣孔之披覆層銲道（圖8(b)）。

3.4 IN738LC 披覆處理龜裂分析

以 IN738LC 粉末進行雷射之披覆處理，銲道產生明顯之橫向凝固熱裂裂縫，經即時（Real time）X 光非破壞檢測亦顯示熔融線及熱影響區龜裂裂痕，故 IN738LC 粉末不適用於 IN738LC 葉片材料之不預熱雷射披覆處理。以 IN625 粉末進行 3-D 披覆處理之試片經螢光 PT 檢測未發現銲道處有裂縫，但在熔融線附近發現有微細裂縫（Liquidation crack）如圖9所示。圖10為 IN625 粉末披覆 IN738 母材試片之 EPMA 定量分析結果，其中 Mo 與 Co 為成分差異最為顯著之元素。其結果顯示母材熔融區約為 0.2mm，熔融區控制在 0.2mm 以下即可大幅降低 IN625 粉末披覆 IN738LC 產生微裂縫。而以 Waspaloy 粉末進行 IN738LC 葉片材料 3-D 披覆處理之試片經金相觀察顯示 Waspaloy 之裂縫發生於填銲高度高於 3mm 以上之填銲銲道表面，低於 3mm 之填銲區亦未發現垂直銲道之裂縫。實驗結果顯示 IN625 粉末適合 IN738LC 母材之 3-D 雷射層加工披覆處理，可銲補葉片之低負荷應力龜裂缺損區域。Waspaloy 粉末僅適合 3-D 披覆低於 3mm 以下之龜裂區填銲。

3.5 銲件機械性質

圖11為 IN738、IN625 及 Waspaloy 粉末披覆 IN738LC 銲件之微硬度分佈情形，在熔融線及熱影響區之微硬度值（約為 439~503Hv）遠高於母材，此乃銲道凝固過程 γ' 相之晶出產生體積收縮而使銲道

熔融線產生變形而具有高度差排密度所引起[4]。衝擊實驗結果顯示，IN738LC 母材衝擊值為 3.2J，衝擊破斷面呈現沿著樹狀晶間產生延性之劈裂型態[5]，如圖12所示；而 IN625 全銲道試片其衝擊值為 16.9J，破斷面呈現以 dimple 為主之延性破壞如圖13所示。

3.6 實體葉片之雷射披覆處理

以雙送粉噴嘴進行雷射披覆處理 ABB 第三級氣渦輪機葉片銲補後之外觀照片如圖14(a)與(b)所示。由圖中可知以雷射披覆處理製程進行氣渦輪機葉片低應力區之再生銲補，不僅可避免 IN738LC 母材銲補過程之龜裂亦可得到高品質之銲修結果。

4、結論

- (1) 單送粉噴嘴雷射披覆層加工處理製程具有方向性，且三度空間成形性較差。而雙送粉噴嘴則較無方向性問題，其三度空間成形性較佳。
- (2) 雷射披覆處理使用之粉末包括：IN738 粉末、IN625 粉末及 Waspaloy。其中 IN738 粉末於雷射披覆處理過程易產生銲道凝固龜裂，故無法應用於 IN738LC 母材之雷射披覆處理。
- (3) IN625 粉末及 Waspaloy 粉末可用於 IN738LC 材料之雷射包覆處理，唯 Waspaloy 粉末之披覆銲道之高度不得超過 3mm，以免銲道產生龜裂。
- (4) 介面以及披覆層間的氣孔，可藉由改善銲道保護氣體、減少粉末輸送量與輸送氣體流量及增加雷射功率，以降低介面的氣孔。
- (5) 由實驗結果顯示，雷射披覆處理製程非常適合 IN738LC 氣渦輪機之銲補亦可得到高品質之再生件，特別是在低應力區損傷葉片之再生處理。

5、參考文獻

1. E. W. Kreutz, G. Backes, A. Gasser, and K. Wissenbach, Applied Surface Science, no. 86, 1995, pp.310-316
2. Matthew J. Donachie, Jr., "Superalloys", 1984, pp.3-15
3. J. Lin and W. M. Steen, Journal of Laser Application, vol. 10, no. 2, 1998, pp.55-63
4. 吳憲政、謝武儒，「鎳基超合金 IN738 銲接性研究」，中華民國銲接協會 88 年年會論文集，pp.D36-D41
5. Ercan Balıkcı, R. A. Mirshams, A. Raman, Materials Science and Engineering, no.265, 1999, pp.50-62

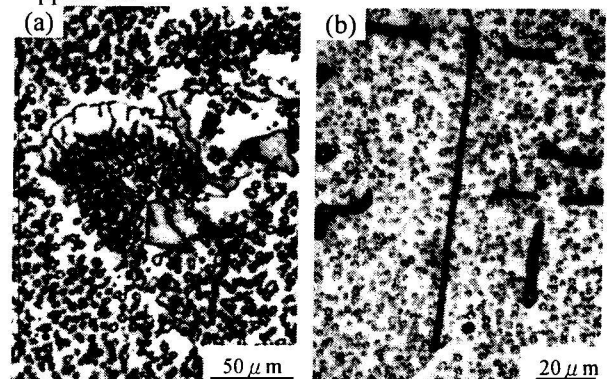


圖1 IN738LC 葉片材料之光學顯微組織(a)初析之 γ' 相與微細 γ' 相(b)基底析出之針狀物

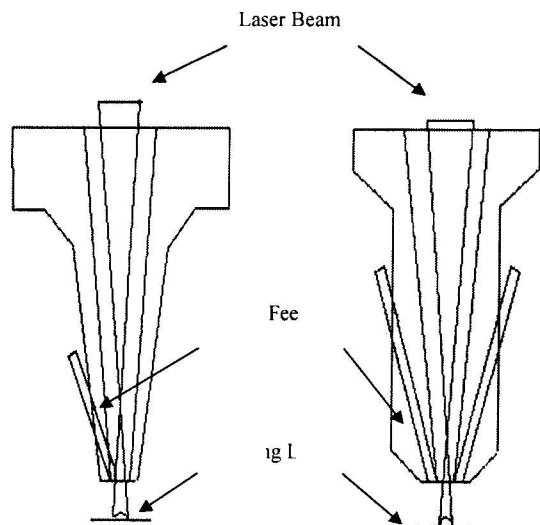


圖 2 噴嘴設計示意圖 (a) 單送粉與 (b) 雙送粉噴嘴

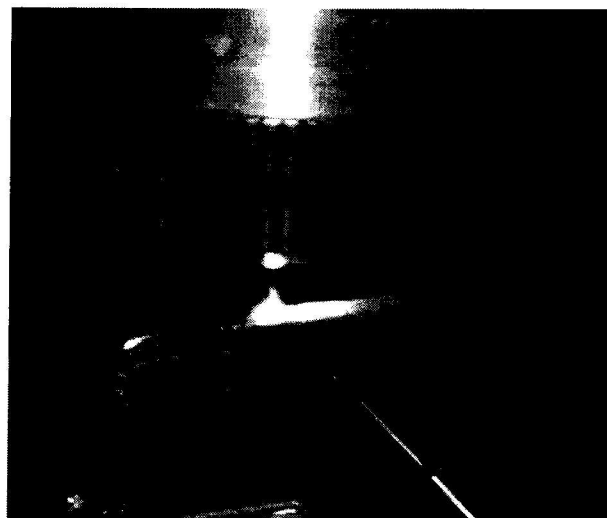


圖 5 雷射層加工披覆處理照片

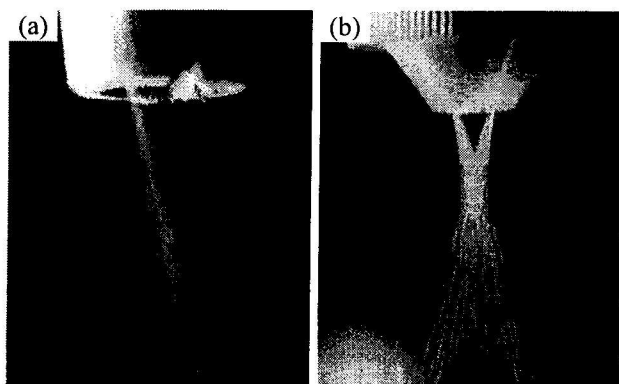


圖 3 進行送粉測試之粉末集中程度外觀照片 (a) 單送粉與 (b) 雙送粉噴嘴

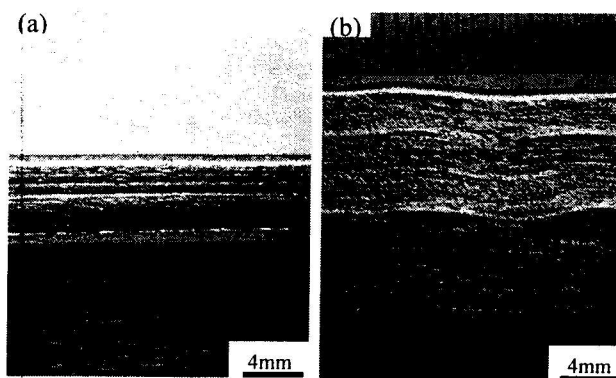


圖 6 使用 (a) 單送粉 (b) 雙送粉噴嘴製作板狀 3-D 成型之外觀照片

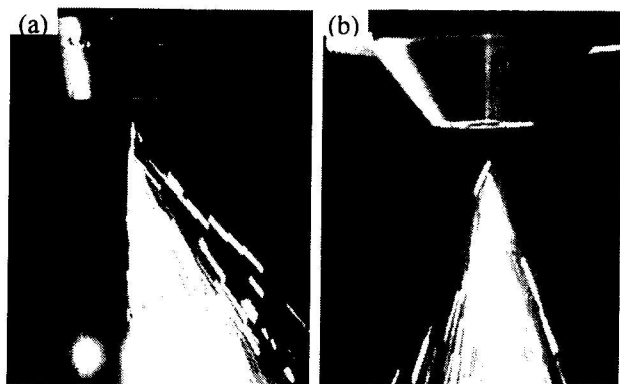


圖 4 粉末與雷射交互作用情形 (a) 單送粉與 (b) 雙送粉噴嘴

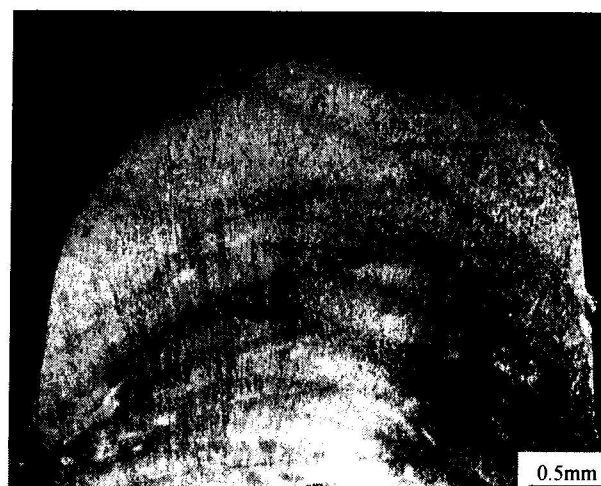


圖 7 雷射披覆處理區之橫截面顯示並無氣孔生成

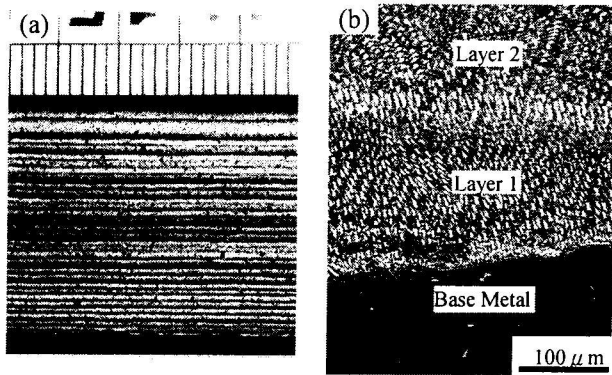


圖 8 最佳雷射披覆參數處理之(a)巨觀與(b)金相組織之照片

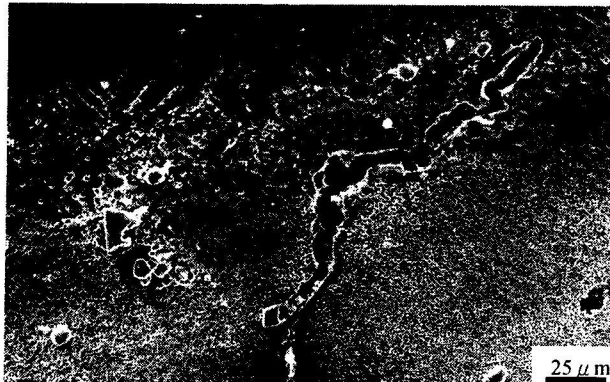


圖 9 IN625 粉末披覆 IN738LC 母材熔融線發現微裂縫之 SEM 照片

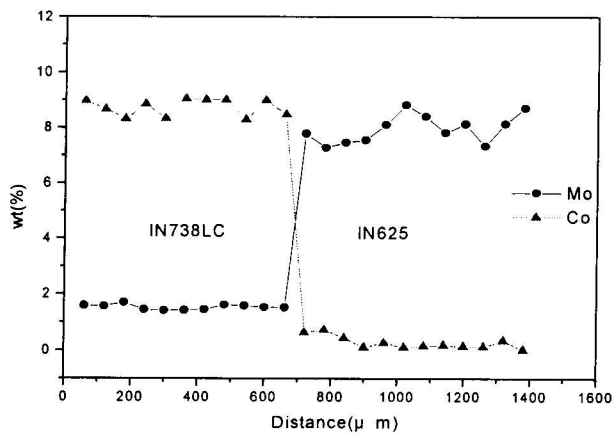


圖 10 IN625 粉末披覆 IN738 母材之 EPMA 定量分析

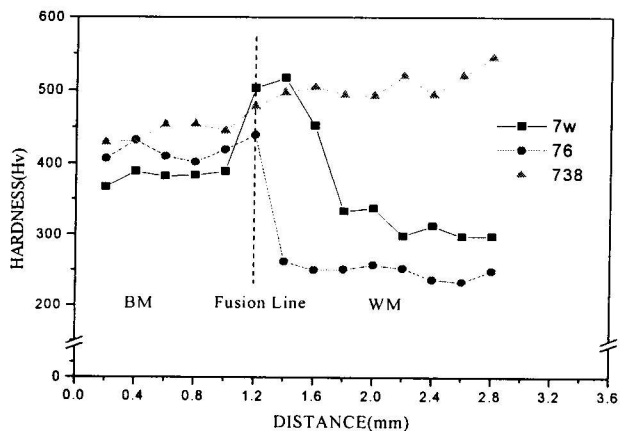


圖 11 IN738LC 經雷射披覆處理後之微硬度分佈圖

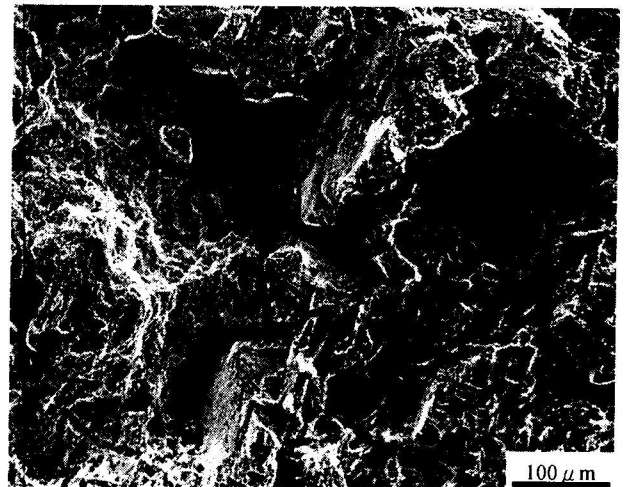


圖 12 IN738LC 母材衝擊破斷面之 SEM 照片

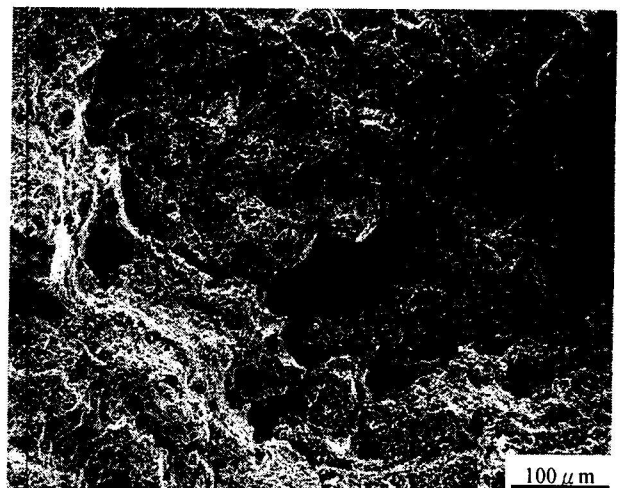


圖 13 IN625 全銲道衝擊破斷面之 SEM 照片

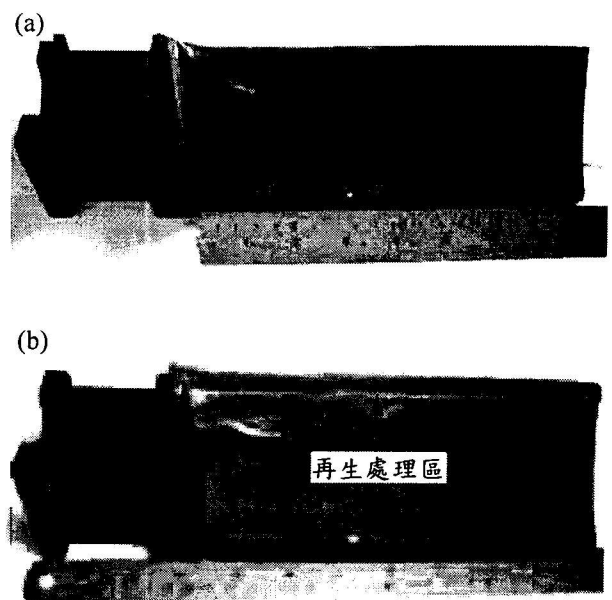


圖 14 渦輪葉片雷射(a)銲補前與(b)銲補後之外觀