

# 雷射表面薄層噴覆之製程開發

## Process Development of Laser-surface thin film Deposition

計畫編號：NSC 91-2216-E-002-032

執行期限：91年8月1日至92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：林蔚祺、吳憲政 台灣大學材料科學與工程研究所

### 摘要

本研究係應用雷射同軸送粉噴嘴，進行表面薄層噴覆與其特性之研究。實驗採用鈷基 Stellite No.6、306、Tribaloy T-900 與 410 不銹鋼做為噴覆粉末，進行雷射噴覆處理之製程參數分析，並就噴覆層之抗磨耗性與抗腐蝕性做一綜合之評比。實驗結果顯示，經由適當之製程參數調整，噴覆層厚度可控制在 0.5 mm 以下，且稀釋率與工件變形量極低，適合作為精密工件之局部表面改質製程。比較各噴覆層之性質，顯示鈷基合金較 410 不銹鋼更適用於容易產生研磨磨耗之應用，但其抗磨耗性則並不完全與硬度高低成正比，主要還是取決於對磨的材料與磨耗之形式。噴覆層之抗腐蝕性在 0.1N 的鹽酸溶液中，則以鈷基合金較佳，可產生鈍態保護膜達到抗蝕的效果，但 410 不銹鋼之噴覆層，則不論回火與否，在鹽酸之抗蝕性均不佳。

**關鍵字：**雷射同軸送粉噴嘴、表面薄層特性研究、抗磨耗性、抗腐蝕性

### 1、前言

硬面鍍覆 (Hardfacing Welding) 在工業應用上已具有數十年的歷史，其原理是在母材表面鍍覆一層耐磨或耐蝕之材料。此種施鍍方式不僅可利用鍍覆面之特殊性質延長工具的使用壽命，亦可選用價格低廉之母材，節省材料的費用。然而傳統之鍍覆製程，由於熱輸入量過大，導致稀釋率過高和工件嚴重的鍍後變形，並不適作為精密工件之表面改質需求。而本研究討論的主題，則是利用雷射光源配合同軸送粉噴嘴及 CNC 控制床台，進行表面薄層噴覆的製程開發與特性研究。由於雷射是目前唯一可在大氣環境下能量密度達到  $10^7 \text{ W/cm}^2$  以上的熱源，因此在材料的選用及環境的限制上，均有較大的選擇空間，如配合同軸送粉噴嘴，更可使雷射光同時作用於粉末及基材表面，則噴覆層與基材間即形成一具低稀釋率的冶金鍵結，藉由製程參數之調整，即可在預定目標區噴覆一層低於 0.5 mm 厚的抗磨耗、抗腐蝕的薄層，針對需要精確性與選擇性之工件，雷射表面噴覆製程無疑具有其特殊之優勢。實驗過程中，除利用金相與微硬度檢測，評估表面薄層厚度及品質外，其耐磨耗及抗腐蝕之性能亦為本研究之主要研究項目。

### 2、實驗方法

本實驗使用 5KW 二氧化碳雷射，配合多軸 CNC 床台與同軸送粉噴嘴，進行表面薄層噴覆之製程與特性研究。噴覆過程採用氬氣為保護氣體，氫氣為粉末輸送氣體，以適當之單道次噴覆參數為多道次噴覆之基準。實驗基材為 9 mm 厚之低碳鋼，噴覆材料則分別

為 Stellite No.6 (S-6)、306 (S-306)、Tribaloy T-900 (T-900) 與 410 不銹鋼 (410SS) 之金屬粉末，其成份如表 1 所示。各試片經雷射噴覆處理後，進行硬度及金相組織之觀察，同時對 410SS 之噴覆試片施以  $650^\circ\text{C}$  回火 2 小時之熱處理，藉以評估 410SS 在熱處理前後之性質變化。硬度試驗則以維克氏 (Hv) 硬度量測噴覆層表面與橫截面之硬度值，再利用光學顯微鏡及掃描式電子顯微鏡 (SEM) 搭配 EDS 光譜儀，分析噴覆層之顯微結構與組織特徵。實驗中噴覆層之抗磨耗性乃以自行設計與組裝之磨耗試驗機，採用 Pin-on-Disk 之研磨方式評估，磨耗機示意圖如圖 1 所示。試片經雷射噴覆後，先以磨床將雙面磨平並研磨至 600 號砂紙，再以線切割切取直徑 10 mm 之圓柱型試片，進行磨耗試驗。實驗中設定滑移速度為 0.42 m/s (50 rpm)，荷重 500 gw，盤試片則為 80 # SiC 之砂輪片。試驗中每隔 100 公尺即取下噴覆試片，以微量天平量測其重量損失，觀察磨耗重量損失與滑行距離之關係曲線。噴覆層抗腐蝕性評估則以電化學之動態極化曲線量測為基準，先以銀膠將銅線與試片接合，再利用冷鑲埋鑲埋試片，並研磨至 1000 號砂紙，腐蝕暴露面積為  $0.5 \text{ cm}^2$ ，腐蝕液為 0.1N 之 HCl，掃描速率為 1 mV/S，輔助電極為白金 (Pt)，參考電極為飽和甘汞電極 (S.C.E)，試驗前先將腐蝕液通以氬氣除氧 1 小時，於室溫中進行試驗。

### 3、結果與討論

#### 3.1 雷射噴覆處理之製程分析

雷射噴覆處理之製程參數主要包括：雷射功率、工件移動速率、離焦距離、送粉量與保護氣體流量等，任一參數之變化均將影響噴覆之結果。由於表面薄層噴覆乃以單道次之最佳噴覆參數條件為基礎，再利用 CNC 床台的移動進行大面積的噴覆處理，故瞭解單道次噴覆情況與各項參數之關連至為重要。實驗顯示單道次噴覆層之寬度，主要由雷射功率與離焦距離所控制，離焦距離愈大，寬度愈寬 (圖 2 (a))，但同時雷射功率也需提升，避免產生未熔融之粉末；噴覆層之厚度則由粉末流量與工件移動速度決定，粉末流量愈小，移動速度愈快，噴覆層就愈薄 (圖 2 (b))。而在多道次噴覆試驗中，除需精確控制每道次之製程參數以外，道次間疊覆率之決定亦為重要之影響參數，當疊覆率過大，則噴覆層之厚度與形狀皆無法達到預期之目標 (圖 3 (a))。若欲得平坦之表面，道次間疊覆率則以 30~35% 為佳 (圖 3 (b))。圖 4 為 S-6 經較佳之雷射製程參數噴覆後，橫截面之顯微結構，噴覆層厚度約在 0.35 mm 之間，且其稀釋率極低。而各噴覆粉末經適當之參數調整後 (平均熱輸入

量約在 250~300 J/mm)亦可得到相似之結果,唯 T-900 因含有大量之 Laves 相,在噴覆製程中極易產生裂縫 [1] (圖 5(a))。此一現象可藉由添加熔點與 T-900(1280~1350°C)相近的 S-306 合金粉末 (1260~1310°C) 解決。圖 5(b)為 S-306 及 T-900 依 1:1 之混合比例所得之噴覆層(S-T)橫截面,並無裂縫之存在,可以克服上述之龜裂問題。

### 3.2 金相組織與硬度量測

各噴覆層之光學顯微組織如圖 6 所示。藉由 SEM 與 EDS 分析其元素成份可發現,S-6 之噴覆層為樹枝狀結構,由富鈷之固溶基與包含複雜鎢、鉻等碳化物之共晶結構組成 [2] (圖 6(a))。圖 6(b)則為 S-306 之顯微組織,其中以鈮(5% Nb)為主要之合金強化元素,顯微組織上黑色部分經 EDS 分析後即為碳化鈮之成份,均於散佈於組織中形成散佈強化機構。T-900 之顯微組織則是由初晶樹枝狀之 Laves 相分散在較軟的共晶基底中所組成 [3] (圖 6(c))。圖 6(d)與 (e)分別為 410SS 噴覆層回火前後之金相組織,由回火前金相組織可發現,疊覆(overlap)處產生近似回火效應,造成組織的不均勻,而回火後的組織則呈現均勻的回火麻田散鐵型態。S-6、S-306、T-900、S-T、410SS 及其回火後之噴覆層橫截面硬度分佈值,如圖 7 所示,各噴覆層之硬度分佈變化不大,對母材之熱影響範圍則約在 0.5 mm 左右。410SS 噴覆層回火後由於 overtempering 之故,在接近母材區域形成約 0.1mm 之軟化層(Hv100)。各噴覆層之表面維克氏(Hv)硬度平均值則如表 2 所示,由於雷射製程快速冷卻之特性,其硬度均較傳統鐳覆製程為高。

### 3.3 噴覆層磨耗性能評估

本研究中噴覆層之抗磨耗性乃以 Pin-On-Disk 的方式,利用較硬之磨片顆粒(SiC)與噴覆層相接觸時,所產生研磨磨耗而造成的重量損失多寡來評定。圖 8 為各噴覆材料經 1000 公尺磨耗試驗後之重量損失比較,顯示鈷基合金噴覆層對刮損磨耗(abrasive wear)的抵抗力明顯較 410 不銹鋼噴覆層為高。由表 2 之硬度比較顯示,抗磨耗性之優劣並不完全決定於硬度之高低,主要還是由接觸時所產生的刮損型態而定。圖 9 為各噴覆層在 SEM 觀察下之磨耗表面,各試片均呈現明顯之溝槽特徵,此乃因較硬之磨片顆粒(SiC)於磨耗時與磨耗面接觸,產生近似連續切削之效果所致 [4],其中 S-6、S-306 與 S-T 之磨耗表面皆以微犁耕(Microploughing)之型態為主,所產生之重量損失極微,分別如圖 9(a)、(b)與(c)所示。而 410SS 磨耗表面,除具有明顯之溝槽外,同時可發現多處長條型之撕裂塊狀表面,推斷此應為 410SS 具有較高之黏著性,在磨屑脫落的同時,將周圍之材料一起撕裂造成黏著磨耗的產生所致,此一長條型撕裂表面(圖 9(d))亦解釋了 410SS 磨耗面重量大幅損失之原因。而 410SS 噴覆層經回火後之試片,則因重量大幅損失,無法達到 1000 公尺之距離,觀察其磨耗表面(圖 9(e)),塊狀撕裂更為嚴重,此應為回火後硬度下降,韌性提升,使黏著磨耗更易發生所致。

### 3.4 噴覆層抗腐蝕能力評估

噴覆層之抗腐蝕能力評估係以動態電極極化曲線測定為基準,實驗中可得到各噴覆層之腐蝕電位( $E_{corr}$ )、腐蝕電流密度( $I_{corr}$ )與腐蝕速率(C.R),藉以評估各噴覆層之抗腐蝕性。圖 10 為各試片在清除表面之氧化層後,以 1 mV/S 之掃瞄速率正向掃瞄至 +1.6 V(相對於 S.C.E)之極化曲線,由圖 10 可知,S-6、S-306 與 S-T 之極化曲線極為相近,均有明顯之鈍態區產生,而 410SS 則顯示了對 0.1N 的 HCl 溶液極差的抗蝕性,各試片之  $E_{corr}$ 、 $I_{corr}$  與腐蝕速率則如表 3 所示。腐蝕後各噴覆層之表面型態,如圖 11 所示,S-6、S-306 與 S-T 之腐蝕表面,其組織極為相似,皆為樹枝狀之腐蝕表面,如圖 11(a)~(c)。圖 11(d)則為 410SS 之腐蝕表面,噴覆層在疊覆處發生嚴重的腐蝕,顯示疊覆處不均勻的回火組織對 0.1N 的 HCl 溶液抗蝕性較差。而 410SS 回火後之腐蝕表面所示,雖然為一均勻腐蝕之表面(圖 11(e)),但其腐蝕速率卻較回火前快,顯示 410SS 噴覆層之回火處理,在 0.1N 的 HCl 溶液之極化腐蝕試驗中,並無法提升其抗蝕性。

## 4、結論

- (1) 雷射表面噴覆可藉由適當之製程參數控制,噴覆一層低於 0.5mm 厚之抗磨耗或抗腐蝕的薄層。此外,由於雷射製程之低熱輸入量與快速冷卻特性,可獲致工件變形量低而硬度高之噴覆層。針對局部處理之精密工件,極具應用價值。
- (2) 噴覆層之幾何外觀受製程參數控制,離焦距離愈大,寬度愈寬,工件走速愈快,粉末流量愈小,厚度愈薄。多道次噴覆時,疊覆率則以 30~35% 為佳,可得較平坦之表面。
- (3) 雷射表面薄層噴覆,可針對不同需求之表面特性,選擇適當粉末(含混合不同合金粉末),達到表面改質之目的。
- (4) 各噴覆層經 1000 公尺磨耗試驗結果顯示,鈷基合金之抗磨耗性明顯優於 410 不銹鋼,且噴覆層之抗磨耗性與硬度高低並無絕對關連,主要還是取決於對磨材料與磨損形式。
- (5) 鈷基合金噴覆層之抗腐蝕性在 0.1N 的 HCl 溶液中明顯優於 410 不銹鋼,其中又以 Stellite 306 與 Tribaloy T-900 混合粉末噴覆層之抗腐蝕性最佳。而 410 不銹鋼之噴覆層,不論回火與否,其在 0.1N 的鹽酸中抗腐蝕性均不佳。

## 5、參考文獻

1. V.M. Weerasinghe and W.M. Steen "Laser Cladding with Pneumatic Powder Delivery" Lasers in Materials Processing. ASM Metals Park, 1983,p.166-174
2. Metal Handbook 9th ed. ASM metals Park,oh 1981,Vol.6,p771-803
3. 周敏傑, "鋼鐵材料之表面硬化及包覆處理之研究",台大碩士論文,民國 75 年 6 月
4. Budkley,Donald H. "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication",Elsevier Press,N.Y.,1981

表 1 試驗材料之化學成份

成份% 材料	Co	Cr	C	W	Mo	Ni	Si	Fe	Mn	S	Nb
低碳鋼	—	0.04	0.14	—	—	0.03	0.27	Bal	0.66	—	—
S-6	Bal	28.5	1.12	5.06	0.35	1.34	1.33	0.99	0.4	0.01	—
S-306	Bal	25	0.4	2	—	6	1	4.0	1	—	5
T-900	Bal	18	0.08	—	23	16	2.7	—	—	—	—
410SS	—	12.5	0.15	—	0.02	0.11	0.51	Bal	0.14	0.01	—

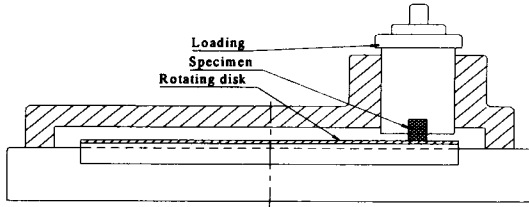


圖 1 磨耗試驗機構示意圖

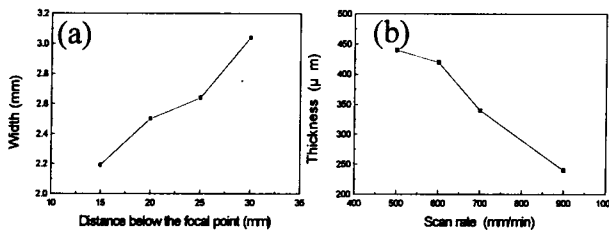


圖 2 固定雷射功率 2.5KW 與 S-6 粉末流量 13.5 g/min 條件下之(a)離焦距離對寬度與(b)工件移動速度對厚度之影響

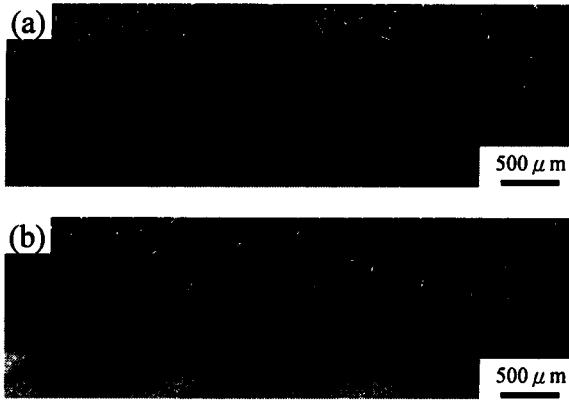


圖 3 多道次雷射噴覆疊覆率(a) 50% 與(b) 32% 之橫截面

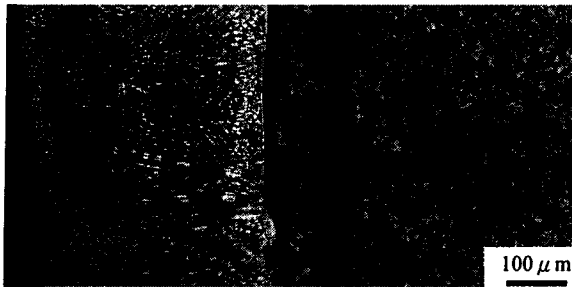


圖 4 S-6 噴覆層經適當參數調整之橫截面外觀

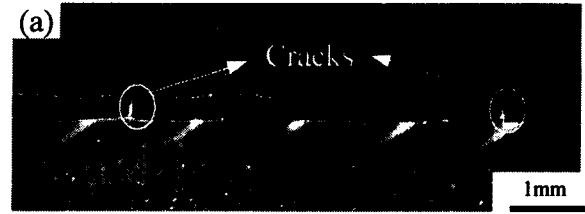


圖 5 雷射噴覆層橫斷面觀察(a) T-900 (b) S-306 與 T-900 混合粉末(1:1)

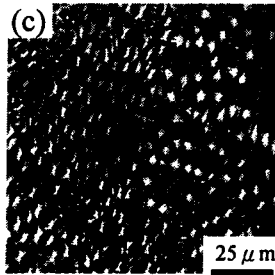
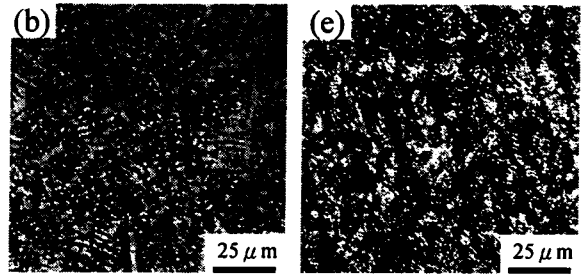
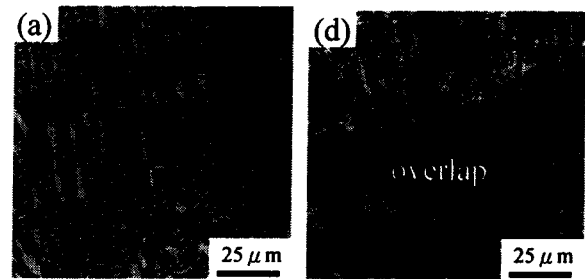
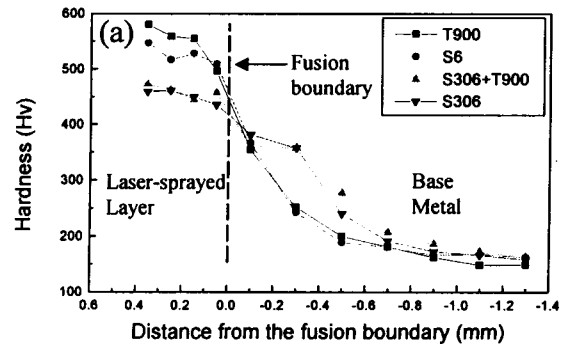


圖 6 各噴覆層之金相顯微組織

- (a) S-6
- (b) S-306
- (c) T-900
- (d) 410SS (as-weld)
- (e) 410SS (tempered)



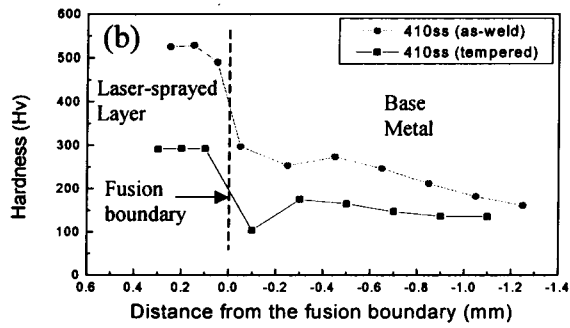


圖 7 噴覆層橫截面硬度(a)鈷基合金與(b)410 不銹鋼

表 2 試驗材料表面維克氏(Hv)平均硬度

試驗材料	S-6	S-306	T-900	S306 & T900	410SS as-weld	410SS tempered
硬度平均值(Hv)	530	456	564	464	517	292

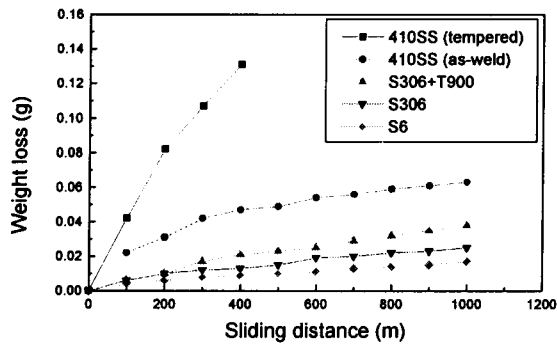


圖 8 各噴覆層經 1000 公尺磨耗試驗之重量損失

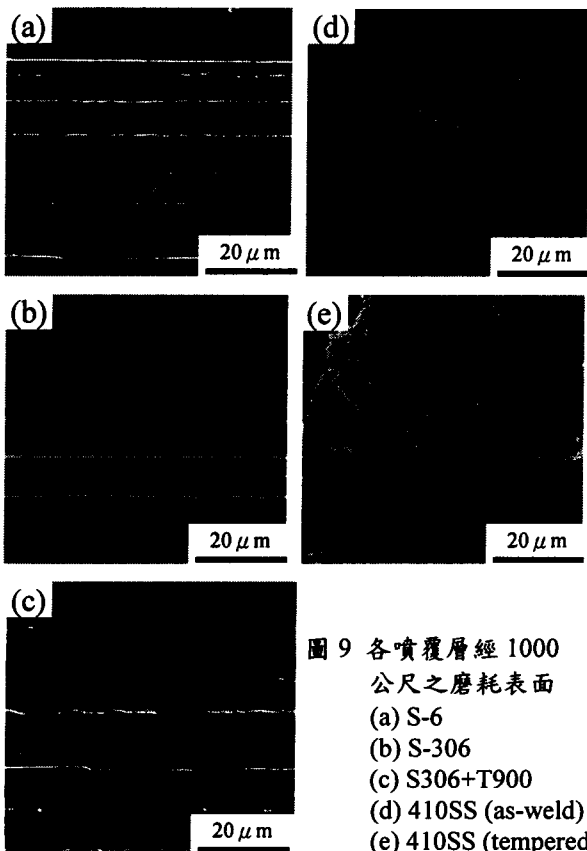


圖 9 各噴覆層經 1000 公尺之磨耗表面  
(a) S-6  
(b) S-306  
(c) S306+T900  
(d) 410SS (as-weld)  
(e) 410SS (tempered)

表 3 各噴覆層在動態電位極化測試中各電化學參數

材料	$E_{corr}(mV)$	$I_{corr}(10^{-6}/cm^2)$	Corr Rate (MPY)
S-6	-384.3	4.153	1.158
S-306	-421.9	15.85	4.418
S306+T900	-305.6	11.96	3.952
410SS (as-weld)	-505.1	44.91	12.52
410SS (tempered)	-540.4	63.47	17.69

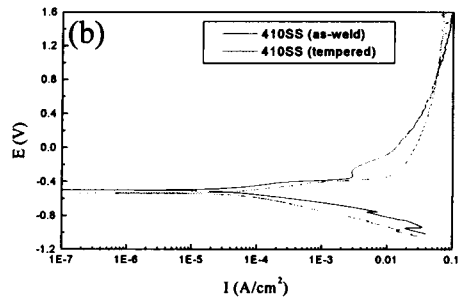
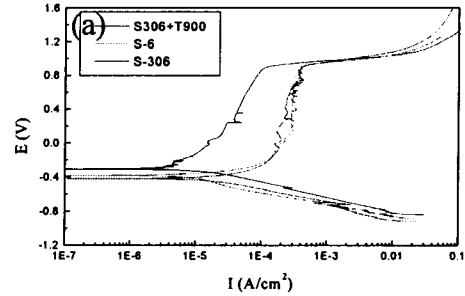


圖 10 各噴覆層在 0.1N 之 HCl 溶液中之極化曲線(a)鈷基合金(b)410 不銹鋼

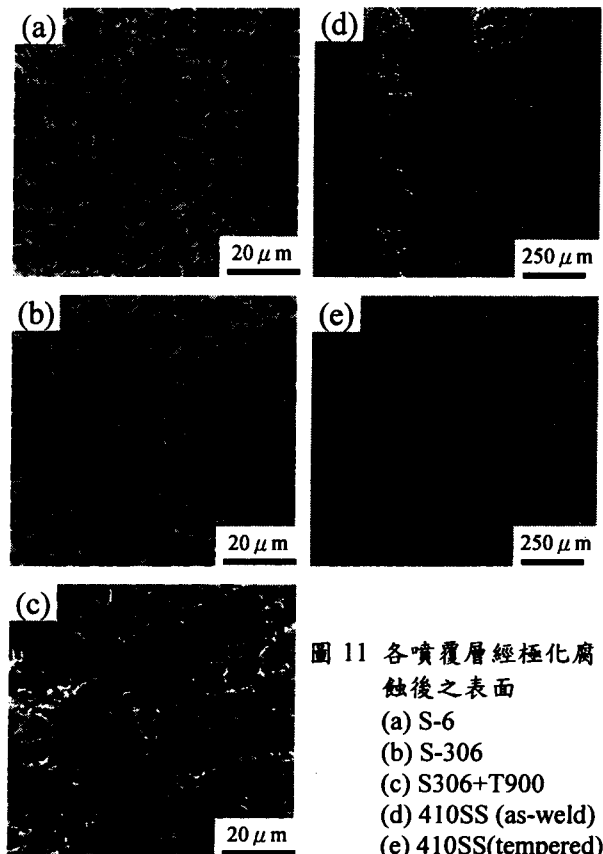


圖 11 各噴覆層經極化腐蝕後之表面  
(a) S-6  
(b) S-306  
(c) S306+T900  
(d) 410SS (as-weld)  
(e) 410SS (tempered)