



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程



10.6376/JCCE.201806\_32(2).0002

## 沃斯田鐵系不銹鋼銲道經表面處理後殘留應力與應力腐蝕之研究 Effect of Different Surface Treatment on Residual Stress and Corrosion Behaviors of Austenitic Stainless Steel Welds

林啟明<sup>1</sup>、李承育<sup>2</sup>、陳尚青<sup>2</sup>、李佳峻<sup>2</sup>、周燕龍<sup>3</sup>、吳威德\*<sup>2</sup>

C. M. Lin<sup>1</sup>, C. Y. Lee<sup>2</sup>, S. C. Chen<sup>2</sup>, C. C. Lee<sup>2</sup>, Y. L. Chou<sup>5</sup>, W. Wu<sup>\*2</sup>

### 中文摘要

AISI 304 不銹鋼為 300 沃斯田鐵系列之不銹鋼，經過銲接製程後所造成的高拉伸殘留應力皆會造成銲道的應力腐蝕，進而使不銹鋼抗腐蝕能力下降。本研究探討 AISI 304 不銹鋼經自動鎢極氣體保護銲平銲後，藉由研磨、珠擊及雷射衝擊強化等三種不同表面處理，並使用鉻靶殘留應力分析儀、電化學拋光技術及恆電位分析儀，探討表面處理對於 AISI 304 不銹鋼表面與次表面殘留應力分佈情形及應力腐蝕之影響。結果顯示，經過雷射衝擊強化後之銲道擁有最高壓縮殘留應力，且影響次表面殘留應力分佈亦為最深；腐蝕電流則隨著殘留壓縮應力的增加而下降。雷射衝擊強化為本研究中防止應力腐蝕最有效之方法。

**關鍵詞：**304 不銹鋼、銲接、珠擊、雷射衝擊強化、殘留應力、應力腐蝕。

### Abstract

In this study, it is designed to investigate the AISI 304 stainless steel after gas tungsten arc welding (GTAW) then go through in three different surface treatment to explore the relationship about the surface and sub-surface residual stress、metallographic study and corrosion test. Three kinds of surface treatment conditions were grinding, shot peening and laser shock peening (LSP). The residual stress was measured by Cr target x-ray analyzer and corrosion test was measured by potentiostat. Result show that welding treated by LSP has largest compressive residual stress and the most deep affect zone in sub-surface, which also has the best corrosion resistance.

收到日期：2017 年 08 月 14 日

修訂日期：2018 年 12 月 17 日

接受日期：2019 年 05 月 14 日

<sup>1</sup> 國立中興大學金屬研發中心

<sup>1</sup> Center for Research and Development of Metal, National Chung Hsing University

<sup>2</sup> 國立中興大學材料科學與工程學系

<sup>2</sup> Dept. of Materials Science and Engineering, National Chung Hsing University

<sup>3</sup> 海軍保修指揮部

<sup>3</sup> Navy Command R.O.C

\*聯絡作者：[weite@dragon.nchu.edu.tw](mailto:weite@dragon.nchu.edu.tw)

Furthermore, we can find different surface treatment actually cause the microstructure refinement and homogeneity of microstructure distribution by Debye ring and profile analysis.

**Keywords:** AISI 304 Stainless Steel, Shot Peening, Laser Shock Peening, Residual Stress.

## 1. 前言

AISI 304 不銹鋼因添加鉻、鎳等元素使其具有良好的硬度、加工性與可銲性，在不銹鋼中屬於中強度等級。也因其具有極優良的抗應力腐蝕裂縫和良好的機械外型與光亮外表，被廣泛應用於建築、食品等器材，為不銹鋼中應用最廣泛的種類。在銲接工業中，AISI 304 不銹鋼普遍被使用氣體氬銲。銲接過程中，工件被注入大量的熱以溶解母材的局部區域，產生不平均的溫度分佈及凝固收縮，進而在銲道產生極高的殘留應力。在嚴峻的環境中，如核能發電廠的乾儲筒或沿海岸邊的建築物，因其環境潮濕且氯離子含量極高，氯離子易從銲道附近產生晶界腐蝕破壞。在達成張應力、腐蝕環境與敏感性材料這三大因素下，就非常容易造成應力腐蝕(SCC)<sup>[1]</sup>。

由於台灣屬於海島型國家，應力腐蝕等問題特別嚴重。國內相關領域學者更是花費不少時間及金錢進行相關研究，為了克服不銹鋼銲道的銲接缺陷與抗腐蝕性質，降低銲接後的表面高殘留應力值為首要事項。故本研究重點在於經由不同的表面處理，如研磨、珠擊與雷射衝擊強化，對於 AISI 304 不銹鋼的表面殘留應力改變狀態及次表面壓應力影響層，進而分析不銹鋼銲接後銲道的抗腐蝕能力。

## 2. 實驗方法

### 2.1 研究試片

本研究使用 AISI 304 不銹鋼進行實驗，其試片規格大小為 150\*60\*6 mm，總數四片，化學成分如表一所示<sup>[2]</sup>；銲接方法使用鎢極氣體保護電弧銲(GTAW)於試片上平銲一條銲道，銲接參數如

表二所示。將其中三片試片分別對表面採取研磨、珠擊與雷射衝擊強化之表面處理，與未加工之試片做比較，觀察銲道殘留應力之消除情形。

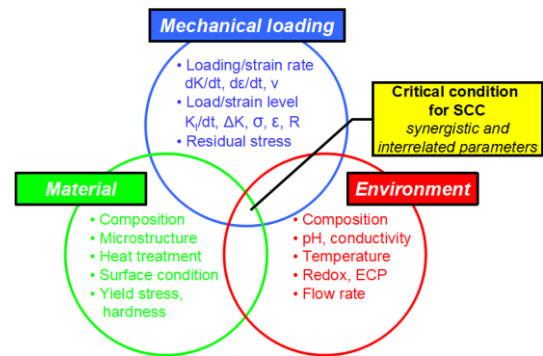


圖 1 應力腐蝕三要素<sup>[1]</sup>。

Figure 1 Critical condition for stress corrosion cracking (SCC).

表 1 AISI 304 不銹鋼成分表<sup>[2]</sup>。

Table 1 The composition of AISI 304 stainless steel.

化學成份 (wt%)			
C	Si	Mn	P
≤ 0.080	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045
S	Ni	Cr	Mo
≤ 0.030	8.0~11.0	18.0~20.0	

表 2 AISI 304 不銹鋼銲接參數。

Table 2 Parameter of gas tungsten arc welding.

銲接參數	
Welding process	GTAW
Arc current	120A
Arc voltage	10V
Traveling speed	100mm/min
Protective gas	Argon, 15L/min
Electrode	Tungsten

其中，雷射衝擊強化 (Laser Shock Peening, LSP) 為通過高功率密度的雷射通過透明約束層，作用於金屬表面塗覆層，塗覆層吸收激光能量迅速形成大量稠密的高溫、高壓等離子體，然後形成高強度衝擊波作用於金屬表面。當衝擊波的壓力超過材料動態屈服強度時，材料發生塑性變形進而改變殘留應力狀態<sup>[3]</sup>，其示意圖如圖 2 所示。

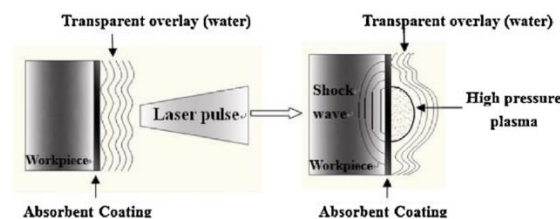


圖 2 雷射衝擊強化過程示意圖<sup>[3]</sup>。  
Figure 2 Principle of laser shocking peening.

## 2.2 Debye 環分析及表面與次表面殘留應力量測

本研究使用  $\mu$ -X360 應力量測儀進行殘留應力之量測，其計算原理為  $\cos\alpha$  法<sup>[4-6]</sup>，在相同 X-ray 照射面積中， $360^\circ$  地蒐集繞射訊號以形成德拜-謝樂環，滿足布拉格定律的晶面產生繞射便有繞射圓錐出現，將此圓錐投影到平面即成為德拜-謝樂環 (Debye-Scherrer ring)，如圖 3 所示。環上每個點即為產生繞射的平面 (hkl)，如圖 4，且環越完整代表 X-ray 繞射至到不同方向的晶粒越多，殘留應力誤差值越小。不同半徑的環即為某一晶粒方向上之 (hkl) 面，不同晶面呈現不同半徑之德拜-謝樂環，訊號越強則代表該方向的晶粒數越多。鉚道次表面處理則使用電化學拋光法將鉚道逐層拋光腐蝕，再進行殘留應力之量測。

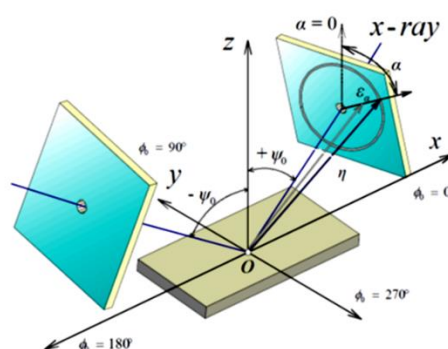


圖 3 德拜-謝樂環示意圖<sup>[4-6]</sup>。  
Figure 3 Principle of Debye-Scherrer ring.

## 2.3 動態極化測試

本研究利用三極電化學裝置測量四組試片的腐蝕電位和腐蝕電流。其輔助電極為白金電極，參考電極為 Ag/AgCl (相對於標準氫電極等於 0.244V)，工作電極為各個經鉚接之試片，將其浸泡在 0.5M 的 NaCl 水溶液中下進行實驗，電位由 -1000mV 掃描至 1000mV 掃描速率為 0.1667mV/s，接續再利用塔伏外插法推算出腐蝕電位及腐蝕電流。

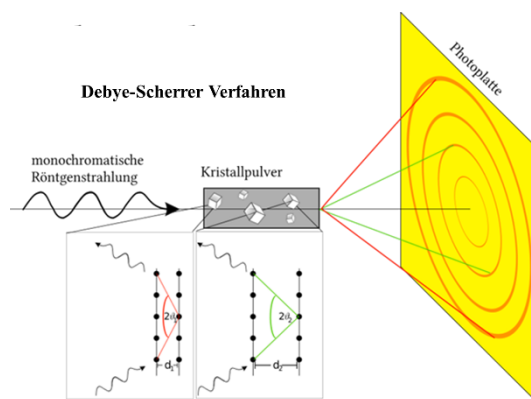


圖 4 不同晶面呈現不同半徑之德拜-謝樂環<sup>[7]</sup>。  
Figure 4 Different crystal plane with various radius Debye-Scherrer ring.

## 2.4 表面形貌觀察

將試片經過 400、800、1200 及 1500 號砂紙拋光後，再使用  $1\mu\text{m}$  的氧化鋁粉拋光液將微小刮痕拋掉，隨後進行水拋。經由王水將試片腐蝕後並用酒精清洗，再放到光學顯微鏡下觀測，藉由光學顯微鏡的觀察可以觀察鉚道表面金相之改變情形。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 鐸道經處理後表面殘留應力分析

經不同表面處理後之試片其殘留應力分佈情形如圖 5 所示。圖 5 黑色線段為無加工試片殘留應力分佈情形，可以發現鐸道區域呈現極高的張應力，兩側基材則為了抵銷鐸道區域的張應力而產生壓應力保持應力之平衡。

圖 5 紅色線段與藍色線段分別為經過研磨與珠擊之試片殘留應力分佈情形。經過這兩種表面處理皆可使鐸道區域殘留應力均勻化，而珠擊之鐸道比研磨之鐸道呈現較高的壓應力，因珠擊施於鐸道之力量較研磨強烈，造成鐸道表面有更高的變形量而產生較大之壓應力。

圖 5 橘色線段為經雷射衝擊強化 (LSP) 之試片殘留應力分佈情形。鐸道因為經 LSP 爆炸性的衝擊，使得整體晶格壓縮量最大，擁有最高之壓應力。而相較研磨、珠擊等大範圍表面處理，LSP 的雷射光束只有 3mm，因此對試片造成的壓應力區域僅在鐸道與熱影響區，而基材部分則為了抗衡此區域的高壓應力而呈現高張應力。

#### 3.2 鐸道次表面殘留應力深度分佈分析

經不同表面處理後之試片其次表面殘留應力

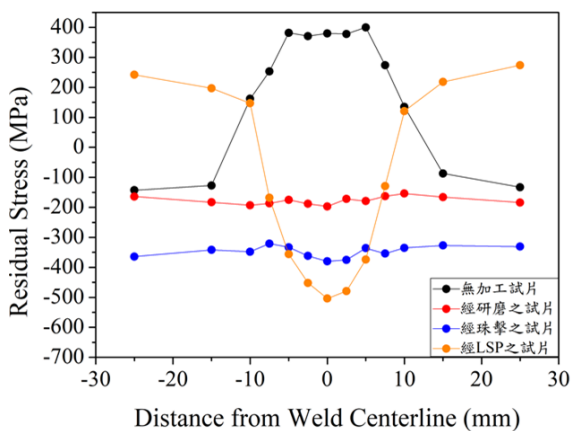


圖 5 試片經不同處理後表面殘留應力分佈圖。

Figure 5 Surface residual stress distribution by different surface treatment.

分佈情形如圖 6 所示，每次電化學拋光深度為 0.02mm。黑色線段為無加工試片次表面殘留應力分佈情形，可以發現張應力最大值位於距表面深度 0.02mm 處，並非位於鐸道表面。理論上鐸道表面處應擁有最大的張應力，但由文獻得知<sup>[8,9]</sup>，鐸後的冷卻過程中鐸道整體處於非常不安定的狀態，當表面殘留應力最大時，應力會優先從此處消耗而造成應力釋放，導致鐸道完全冷卻後表層殘留應力較次表面殘留應力值低。而加工造成材料產生殘留應力影響範圍層主要因為表層和內部材料塑性變形程度的不均衡；當層深增加到一定程度時，材料只會發生彈性變形，當加工過程結束時，彈性變形區域會有恢復到原來狀態的趨勢，故會使得內部材料對表層產生約束，從而產生殘留壓應力<sup>[10]</sup>，而無數凹陷或壓痕的重疊形成了較均勻的殘留壓應力層<sup>[11]</sup>。

圖 6 紅色、藍色與橘色線段分別為經過研磨、珠擊與雷射衝擊強化之試片次表面殘留應力分佈情形。三組試片的最大壓應力皆非位於鐸道表面，造成如此殘留應力分佈主要是由於表面處理中，赫茲應力佔有主導作用，使得最大剪切應力發生在次表層而非表層，使次表層發生最大的塑性變形，從而引發最大的殘留壓應力<sup>[12]</sup>。此外，經由

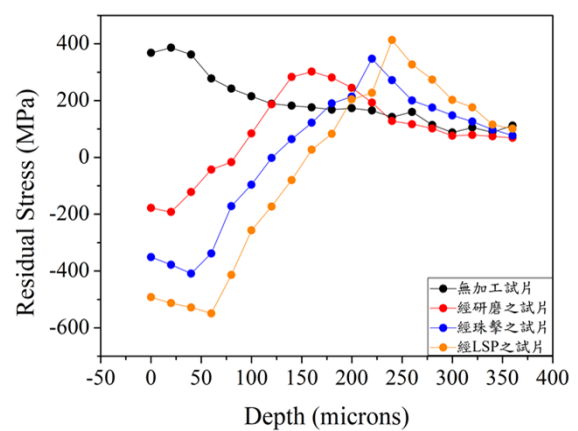


圖 6 試片經不同處理後次表面殘留應力分佈圖。

Figure 6 Sub-surface residual stress distribution by different surface treatment.



圖中也可發現，經表面處理後的鐳道其次表面一定深度產生與近表面相異之高張應力，其原因為要與近表面之高壓應力達成應力平衡。

### 3.3 動態極化測試

利用恆電位儀得到的極化曲線如圖 7 所示。由圖可以得知，鐳道經外在加工之腐蝕電位並無太大的變化。腐蝕電流則經過塔伏外插法計算後得出，未加工、研磨、珠擊與雷射衝擊強化之鐳道腐蝕電流分別為  $99.46\mu\text{A}$ 、 $94.01\mu\text{A}$ 、 $74.90\mu\text{A}$  及  $42.07\mu\text{A}$ 。經表面處理之鐳道其電流密度值均比未經處理之鐳道還低，且經雷射衝擊強化之鐳道擁有最低的腐蝕電流，表示有最佳抗腐蝕能力，故推測一定程度下的高殘留壓應力存在能有效地改善材料的抗腐蝕能力，延長鐳道的安全工作壽命 [13-15]。

### 3.4 鐳道 Debye 環與 Profile 分析

鐳道經不同的表面處理後經由 X-ray 分析之 Debye 環與 Profile 如圖 8 所示。由圖 8(A)可以看出，未加工之鐳道 Debye 環訊號極差，且 Profile 特徵為兩晶格波峰。當鐳道經研磨後，Debye 環訊號稍稍提升，Profile 特徵亦為兩晶格波峰，但

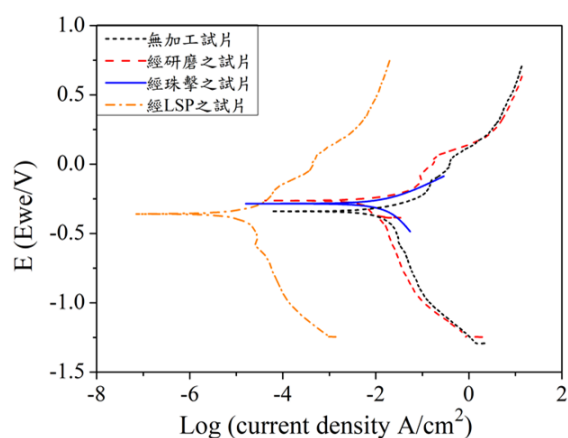


圖 7 電位從 -1.0V 掃描至 1.0V 之動態極化圖。

Figure 7 The dynamic polarization scanned from -1V to 1V.

兩波峰峰值相近，如圖 8(B)所示。圖 8(C)為鐳道經珠擊後 Debye 環與 Profile 分析，此時 Profile 波峰特徵由兩峰值相近之晶格波峰逐漸轉為單一晶格波峰，而 Debye 環訊號因仍含有兩晶格相導致環形不佳，但訊號逐漸趨於完整。圖 8(D)為經雷射衝擊強化之鐳道其 Debye 環與 Profile 分析，可看出此時 Profile 特徵明顯變為單一晶格波峰，且 Debye 環訊號最為完整。根據文獻指出 [16]，在極大之應變作用下，孿晶交叉會把材料晶粒細化成極小之尺度，同時在孿晶交叉處產生應變，誘導材料產生相變，表明加工過程中產生的塑性變形會誘發材料產生相變。

### 3.5 表面形貌觀察

在相同的腐蝕環境、時間下，原始鐳道與經表面加工之鐳道形貌觀察圖如圖 9 所示。圖 9(A)為未加工之鐳道 OM 影像圖，可觀察到原始鐳道有兩種組織。而鐳道經研磨後，OM 影像圖如圖 9(B)所示，黑色部分組織有趨於細小且分散之現象。經珠擊之鐳道其表面形貌如圖 9(C)所示，可以看出黑色部分組織已經明顯分散化，且組織晶粒開始均勻細化。圖 9(D)為經雷射衝擊強化之鐳道 OM 影像圖，此時黑色部分組織晶粒最微細小，組織分佈情形亦最均勻。

比較四張相圖，可以發現當表面加工產生之壓應力越大，晶粒則越細小，組織分佈情形也趨於均勻。OM 影像圖之組織分佈情形結果也與 3.4 節鐳道 Debye 環分析有所吻合，組織分佈情形越均勻，Debye 環訊號越完整。

## 4. 結論

1. 三種表面處理皆能使鐳道表面之殘留應力由張應力轉為壓應力，研磨與珠擊皆能使母材與鐳道產生均勻之壓應力；雷射衝擊強化則因雷射光束範圍限制，僅能使鐳道中心附近

產生壓應力。

- 三種表面處理中，雷射衝擊強化能在表面產生最大的殘留壓應力(-504MPa)，且次表面的影響範圍亦為最深(240microns)。
- 由動態極化測試實驗結果得知，在三種表面處理中，雷射衝擊強化之鍍道擁有最低的腐蝕電流(42.07 $\mu$ A)，表示有最佳的抗腐蝕能力，

而研磨(94.01 $\mu$ A)、珠擊(74.90 $\mu$ A)處理之鍍道抗腐蝕能力則與無表面處理(99.46 $\mu$ A)之結果無太大差異。

- 鍍道在不同的表面處理下，珠擊與雷射衝擊強化之 Debye 環訊號較為完整，Profile 特徵也逐漸轉為單一晶格波峰。

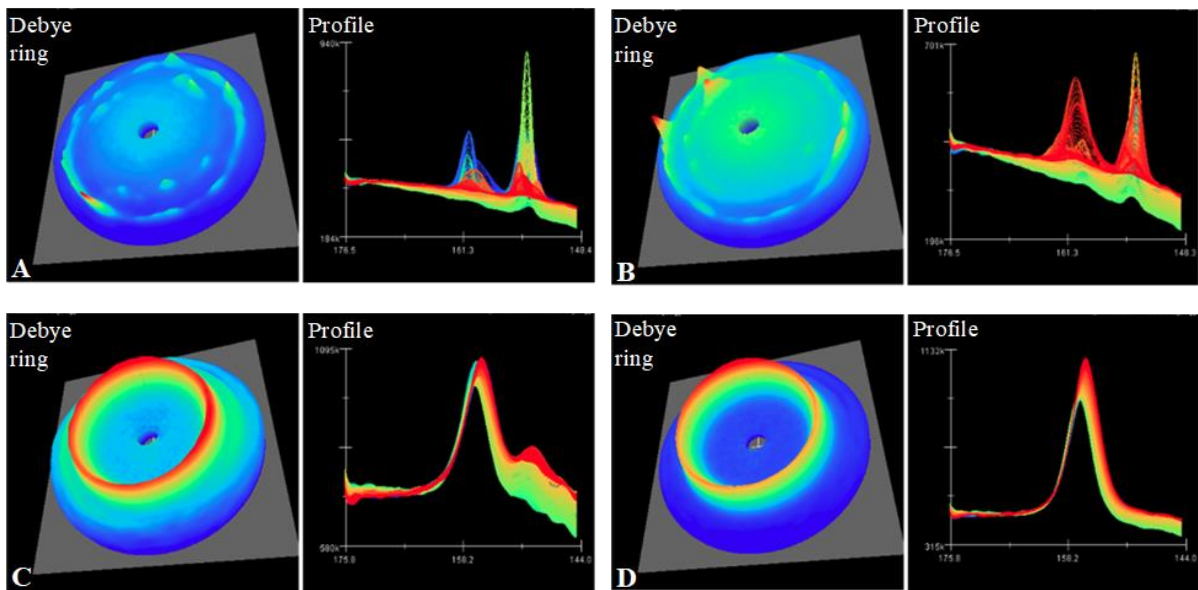


圖 8 鍍道經不同表面處理測得之 Debye 環與 Profile 分析(A)未加工 (B)研磨 (C)珠擊 (D)雷射衝擊強化。

Figure 8 The Debye ring and Profile analysis of different surface treatment. (A)No surface treatment (B)Grinding (C)Shot peening (D)Laser shock peening.

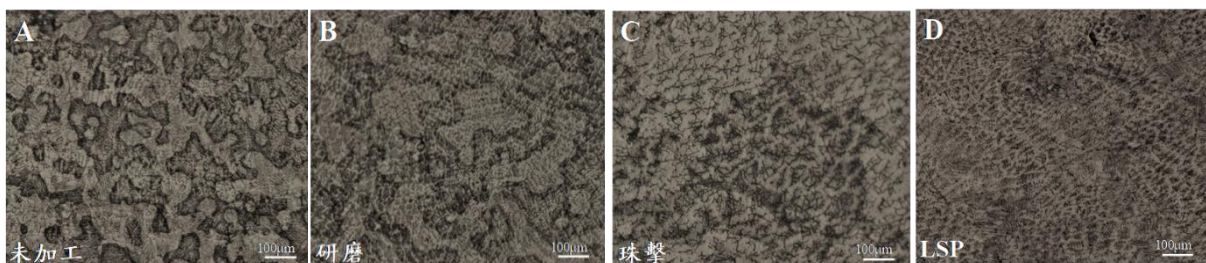


圖 9 鍍道經不同表面處理觀測之 OM 影像圖(A)未加工 (B)研磨 (C)珠擊 (D)雷射衝擊強化。

Figure 9 The metallography diagrams of different surface treatment. (A)No surface treatment (B)Grinding (C)Shot peening (D)Laser shock peening.

## 誌謝

本文承蒙科技部專題研究計畫編號 MOST 106-2218-E-005-003、MOST 105-2221-E-005-018 與編號 MOST 105-2218-E-005-014 經費補助，方能順利進行且完成，特此表達感謝之意。

## 參考文獻

- [1] “Environmentally Assisted Cracking of Types 304L/316L/316NG Stainless Steel in 288°C Water”, P. L. Andresen and C. L. Briant, *Corrosion*, 45 (1989) p.448.
- [2] 祥碩企業有限公司，銹鋼線材化學成份及用途，取自<http://www.hsiangshuo.com.tw/>
- [3] “Effects of LSP on Micro-Structures and Residual Stresses in a 4 mm CLAM Steel Weld Joints”, X. Chen, Y. Fang, S. Zhang, J. F. Kelleher, and J. Zhou, *Fusion Engineering and Design*, 94 (2015) p.54.
- [4] “Development of Measuring System for Stress by Means of Image Plate for Laboratory X-ray Experiment”, K. Hiratsuka, T. Sasaki, K. Seki, and Y. Hirose, *Advances in X-ray Analysis*, 46 (2003) p.61.
- [5] M. Fitzpatrick, A. Fry, P. Holdway, F. Kandil, J. Shackleton, and L. Suominen, in: *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction*, 2nd Ed. (National Physical Laboratory, England, 2005) p.14.
- [6] “Development of Stress Analyzer Using Whole Back Reflection Ring”, Y. Shitaba, T. Ishikawa, S. Ohya, and K. Akita, *Journal of the Society of Materials Science*, 55 (2006) p.1139.
- [7] 張錠全、何嘉文，in：“材料中殘留應力X射線衍射分析和作用”，西安交通大學出版社（中國，陝西，1991），第67頁。
- [8] “Effect of Surface Preparation on the Corrosion of Austenitic Stainless Steel 304L in High Temperature Steam and Simulated PWR Primary Water”, S. Cissé, L. Laffont, B. Tanguy, M. Lafont, and E. Andrieu, *Corrosion Science*, 56 (2012) p.209.
- [9] “Texture Evolution and Residual Stress Relaxation in a Cold-Rolled Al-Mg-Si-Cu Alloy Using Vibratory Stress Relief Technique”, J. S. Wang, C. C. Hsieh, C. C. Lin, C. W. Kuo, and W. Wu, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44 (2013) p. 806.
- [10] “Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening”, M. Kobayashi, T. Matsui, and Y. Murakami, *International Journal of Fatigue*, 20 (1998) p. 351.
- [11] “Life Assessment Methodologies Incorporating Shot Peening Process Effects: Mechanistic Consideration of Residual Stresses and Strain Hardening Part 1-Effect of Shot Peening on Fatigue Resistance”, K. Soady, *Materials Science and Technology*, 29 (2013) p. 637.
- [12] H. Wohlfahrt, “The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress”, 2nd International Shot Peening Conference, Ed. by H. Fuchs, 1984, pp. 316-331.
- [13] “Residual Stress and Its Role in Failure”, P. Withers, *Reports on Progress in Physics*, 70 (2007) p.2211.
- [14] “金屬材料的噴丸強化原理及其強化機理綜述”，王仁智，*中國表面工程*，第25卷第6期，2012，第1-9頁。

- [15] “Evolution of Residual Stress Redistribution Associated with Localized Surface Microcracking in Shot-Peened Medium-Carbon Steel During Fatigue Test”, J. C. Kim, S. K. Cheong, and H. Noguchi, *International Journal of Fatigue*, 55 (2013) p.147.
- [16] “表面機械研磨誘導 AISI 304 不銹鋼表層納米化 I. 組織與性能”，張洪旺、劉剛、黑祖昆、呂堅、盧柯，*金屬學報*，第 39 卷第 4 期，2003，第 342-346 頁。